



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

ESTUDIO DE REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN CON  
ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS PARA SU USO EN  
REGIONES DE BOLIVIA CARENTES DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA

Alumno: Mikel Fernández de Miguel

Tutor: David Astrain Ulibarrena

Pamplona, 27 de agosto de 2014



## ÍNDICE GENERAL

<b>1. ASPECTOS GENERALES.....</b>	<b>1</b>
1.1. ANTECEDENTES .....	2
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL BIOGÁS .....	4
USOS DEL BIOGÁS .....	5
1.3.1. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS .....	6
PRINCIPIO DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS .....	6
1.3.1.1. PROPIEDADES DEL METANO.....	7
1.3.1.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES EN EL COMPORTAMIENTO ..	8
DIÓXIDO DE CARBONO .....	8
NITRÓGENO Y OXÍGENO .....	9
ÁCIDO SULFHÍDRICO .....	9
AMONÍACO .....	10
SILOXENOS .....	10
1.3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS .....	10
1.3.2.1. MATERIAL DE CARGA PARA LA FERMENTACIÓN .....	10
1.3.2.2. TEMPERATURA .....	11
1.3.2.3. VELOCIDAD DE CARGA .....	11
1.3.2.4. TIEMPO DE RETENCIÓN .....	12
1.3.2.5. ACIDEZ .....	12
1.3.2.6. CONTENIDO DE SÓLIDOS .....	12
1.3.2.7. INCLUSIÓN DE INOCULANTES .....	13
1.3.2.8. AGITACIÓN Y MEZCLADO .....	13
1.3.2.9. RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO.....	14
1.3.2.10. PROMOTORES .....	15
1.3.2.11. INHIBIDORES .....	15
1.4. ANÁLISIS DEL REFRIGERADOR POR ABSORCIÓN .....	16
1.4.1. SISTEMA DE ABSORCIÓN .....	17
PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO .....	18
RENDIMIENTO DE LOS EQUIPOS.....	19
1.4.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABSORCIÓN.....	20
SEGÚN PRESTACIONES.....	20
SEGÚN EL CICLO DE ABSORCIÓN.....	20
SEGÚN LA SUSTANCIA QUE COMPONGA LA SOLUCIÓN.....	21
1.4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE ABSORCIÓN SIMPLE .....	22
1.4.1.3. MEJORAS DE LOS CICLOS DE ABSORCIÓN .....	23
CICLO DE ABSORCIÓN DE DOBLE EFECTO .....	24
CICLO GAX.....	28
CICLO DE ABSORCIÓN DE TRIPLE EFECTO .....	29
EQUIPOS ROTATIVOS.....	30
1.4.2. EQUIPOS CARACTERÍSTICOS .....	30
1.4.2.1. ABSORBEDOR.....	30
1.4.2.2. GENERADOR .....	33
1.4.2.3. CONDENSADOR.....	33
1.4.2.4. VÁLVULA DE EXPANSIÓN .....	34
1.4.2.5. EVAPORADOR .....	34
1.4.2.6. INTERCAMBIADOR DE CALOR.....	35
1.4.2.7. RECTIFICADOR.....	36

	ii
1.4.3. PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL .....	36
1.4.3.1. SUSTANCIAS REFRIGERANTES .....	36
SUSTANCIAS EMPLEADAS EN ABSORCIÓN .....	37
SISTEMA AGUA-AMONÍACO .....	38
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>41</b>
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	41
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	41
<b>3. OBTENCIÓN DE BIOGÁS .....</b>	<b>43</b>
3.1. BIODIGESTOR DE LA UNIVESIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN .....	43
3.2. ALIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR .....	44
3.3. EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS.....	46
<b>4. INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA A PUNTO.....</b>	<b>49</b>
4.1. PUESTA A PUNTO DEL REFRIGERADOR .....	49
4.2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS .....	50
MODELO MATEMÁTICO .....	51
APLICACIÓN DEL MÉTODO MATEMÁTICO .....	56
4.3. TERMÓMETROS.....	59
4.4. CAUDALÍMETRO .....	60
4.5. MECHERO BUNSEN .....	61
4.6. RESULTADOS .....	62
<b>5. ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>67</b>
5.1. CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR .....	67
5.2. COMPRA Y MODIFICACIONES DEL REFRIGERADOR.....	69
5.3. INVERSIÓN INICIAL TOTAL .....	70
<b>6. COMPARACIÓN DE REFRIGERACIÓN CON BIOGÁS Y GLP.....</b>	<b>72</b>
6.1. RESULTADOS OBTENIDOS .....	72
6.2. COSTES .....	73
<b>7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS .....</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>i</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>I</b>
ANEXO A - CÁLCULOS .....	I
BIOGÁS.....	I
GLP .....	VII
ANEXO B - DISPOSITIVOS .....	XII
FRIGORÍFICO .....	XII
TERMÓMETROS .....	XXIII
GASÓMETRO.....	XXIX
ANEXO C – DATOS EXPERIMENTALES.....	XXXII
MEDICIÓN del 5 de DICIEMBRE de 2013, GLP .....	XXXII
MEDICIÓN del 6 de DICIEMBRE de 2013, biogás .....	XXXIX
MEDICIÓN del 12 de DICIEMBRE de 2013, biogás .....	XLII
ANEXO D – PROPIEDADES TERMODINÁMICAS .....	XLVII

	iii
AGUA.....	XLVII
AIRE .....	LIII
AMONÍACO .....	LIX
METANO .....	LXV

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Curva de crecimiento bacteriano.....	13
Figura 1-2. Tipos de agitadores .....	14
Figura 1-3. Sistema de refrigeración por absorción.....	16
Figura 1-4. Procesos de adsorción y absorción.....	17
Figura 1-5. Equipos de una máquina de absorción de simple efecto con bombeo .....	19
Figura 1-6. Esquema de una máquina de refrigeración por absorción con intercambiadores de calor .....	23
Figura 1-7. Equipos de una máquina de absorción de doble efecto en configuración en serie sobre un diagrama p-T .....	24
Figura 1-8. Esquema de flujos de una máquina de absorción de doble efecto LiBr-H <sub>2</sub> O.....	25
Figura 1-9. Variantes del ciclo de doble efecto indicando el recorrido del absorbente .....	26
Figura 1-10. Equipos de una máquina de absorción de doble efecto en configuración en paralelo sobre un diagrama p-T.....	27
Figura 1-11. Equipos de una máquina de absorción de doble efecto en configuración invertida sobre un diagrama p-T .....	28
Figura 1-12. Esquema del absorbedor-generator-intercambiador de ciclo GAX .....	29
Figura 1-13. Representación de un ciclo GAX .....	29
Figura 1-14. Equipo evaporador rotativo.....	30
Figura 1-15. Absorbedor con flujos líquido y vapor continuos.....	31
Figura 1-16. Absorbedor con flujo líquido continuo y vapor discontinuo .....	32
Figura 1-17. Condensador de tubo y aletas.....	34
Figura 1-18. Válvula de expansión termostática de acero inoxidable .....	34
Figura 1-19. Evaporadores de placas .....	35
Figura 1-20. Intercambiadores de calor .....	36
Figura 3-1. Biodigestor después de cargar las garrafas .....	43
Figura 3-2. Conexión eléctrica del compresor .....	44
Figura 3-3. Piscina de biol .....	44
Figura 3-4. Triturando los plátanos.....	45
Figura 3-5. Alimentación del biodigestor .....	45
Figura 3-6. Agitación del biodigestor .....	46
Figura 3-7. Compresión del biogás.....	46
Figura 4-1. Conexión de las garrafas con una presión de 13 bares.....	49
Figura 4-2. Llama obtenida con biogás en el mechero Bunsen .....	50
Figura 4-3. Refrigerador .....	59
Figura 4-4. Medición a la salida del rectificador con el termómetro Comark KM814FS .....	60
Figura 4-5. Gasómetro Sintta Mechanical steel case gas meter conectado al refrigerador.....	61
Figura 4-6. Instalación del mechero .....	62
Figura 4-7. Leyenda.....	62
Figura 4-8. Llama al reducirse el caudal de biogás .....	64
Figura 5-1. Esquema de un biodigestor tubular.....	67
Figura 5-2. Esquema de un biodigestor de domo fijo.....	67

	v
Figura 5-3. Manguera de alta presión .....	69
Figura 6-1. Llama de combustión con GLP .....	73
Figura A-1. Gasómetro Sintta mechanical steel case gas meter .....	XXX

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Usos del biogás.....	5
Tabla 1-2. Composición del biogás .....	6
Tabla 1-3. Propiedades del biogás .....	6
Tabla 1-4. Puntos particulares del metano.....	7
Tabla 1-5. Efecto de los componentes en el biogás .....	8
Tabla 1-6. Producción de biogás de distintos tipos de estiércol .....	10
Tabla 1-7. Rendimiento de la producción de gas a distintas temperaturas .....	11
Tabla 1-8. Producción de gas en distintos rangos de temperatura.....	11
Tabla 1-9. Tiempos de retención de las excretas .....	12
Tabla 1-10. Contenido de sólidos totales.....	13
Tabla 1-11. Relación C/N .....	14
Tabla 1-12. Concentración necesaria de los inhibidores .....	15
Tabla 1-13. COP de una máquina de frío por absorción a gas natural .....	19
Tabla 1-14. COP y COP corregido de máquinas de absorción y motores eléctricos .....	20
Tabla 1-15. Tipos de sistemas de absorción según el ciclo de absorción.....	21
Tabla 1-16. Propiedades medioambientales de las sustancias utilizadas en máquinas de absorción .....	38
Tabla 4-1. Tendencia de temperaturas de la primera prueba .....	63
Tabla 4-2. Temperaturas del sistema estable .....	64
Tabla 5-1. Dimensiones de biodigestores .....	68
Tabla 5-2. Costes de biodigestores según tamaño y modelo .....	68
Tabla 5-3. Gasto del usuario después de subsidio, por región y modelo.....	68
Tabla 5-4. Inversión inicial requerida.....	70
Tabla 6-1. Temperaturas obtenidas con biogás y GLP .....	72
Tabla 6-2. Entalpías obtenidas con biogás y GLP .....	72
Tabla A-1. Datos de las mediciones del 5 de diciembre de 2013 .....	XXXII
Tabla A-2. Datos de las mediciones del 6 de diciembre de 2013 .....	XXXIX
Tabla A-3. Datos de las mediciones del 12 de diciembre de 2013 .....	XLII
Tabla A-4. Propiedades termodinámicas de agua saturada .....	XLVII
Tabla A-5. Entalpía de agua sobrecalentada.....	XLIX
Tabla A-6. Entalpía de agua subenfriada.....	LI
Tabla A-7. Propiedades del aire a distintas altitudes .....	LIII
Tabla A-8. Propiedades termodinámicas del aire a 1 atm de presión.....	LV
Tabla A-9. Propiedades termodinámicas del aire a 75 kPa de presión.....	LVII
Tabla A-10. Propiedades termodinámicas de amoníaco saturado .....	LIX
Tabla A-11. Entalpía de amoníaco sobrecalentado .....	LXI
Tabla A-12. Entalpía de amoníaco subenfriado.....	LXIII
Tabla A-13. Propiedades termodinámicas de metano líquido .....	LXV
Tabla A-14. Propiedades termodinámicas de metano gas a 1 atm de presión.....	LXVI
Tabla A-15. Propiedades termodinámicas de metano gas a 75 kPa de presión.....	LXVII



## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4-1. Temperaturas del sistema, 6 de diciembre de 2013.....	63
Gráfico 4-2. Temperaturas del sistema, 12 de diciembre de 2013.....	64
Gráfico 4-3. Ciclo de refrigeración con biogás.....	65
Gráfico A-1. Mediciones de temperaturas con GLP el 5 de diciembre de 2013 .....	XXXVI
Gráfico A-2. Volumen de GLP consumido en la prueba del 5 de diciembre de 2013.....	XXXVII
Gráfico A-3. Caudal de GLP circulante en la prueba del 5 de diciembre de 2013.....	XXXVII
Gráfico A-4. Ciclo de refrigeración con GLP del 5 de diciembre de 2013 .....	XXXVIII
Gráfico A-5. Mediciones de temperaturas con biogás el 6 de diciembre de 2013 .....	XL
Gráfico A-6. Volumen de biogás consumido en la prueba del 6 de diciembre de 2013.....	XLI
Gráfico A-7. Caudal de biogás circulante en la prueba del 6 de diciembre de 2013.....	XLI
Gráfico A-8. Mediciones de temperaturas con biogás el 12 de diciembre de 2013.....	XLIV
Gráfico A-9. Volumen de biogás consumido en la prueba del 12 de diciembre de 2013.....	XLV
Gráfico A-10. Caudal de biogás circulante en la prueba del 12 de diciembre de 2013.....	XLV
Gráfico A-11. Ciclo de refrigeración con biogás del 12 de diciembre de 2013 .....	XLVI



## 1. ASPECTOS GENERALES

El término “energía renovable”, hace referencia a la energía obtenida mediante métodos que pueden ser explotados ilimitadamente, es decir, se puede acceder a esa fuente energética sin reducir su disponibilidad. Además de esto, son aquellas que no contaminan, ni ocasionan cambios climáticos perjudiciales para el planeta. En la sociedad actual, y en las futuras, un desarrollo sostenible de las mismas, implica un uso mayoritario de este tipo de energía.

La principal fuente de energía renovable de la que se dispone es el sol, del que llega energía externa al planeta. La naturaleza transforma esta energía en otros tipos, el aumento de temperatura de masas de agua y de aire provoca su movimiento, creando la energía de las olas o la eólica y las plantas aprovechan la luz solar para realizar la fotosíntesis.

La energía solar es una fuente inagotable, que hace crecer los cultivos y las zonas forestales de modo que pueden ser explotadas para alimentación; de personas, ganado, o como materia prima para otras tareas. El empleo de materia y/o energía siempre produce un residuo, que puede ser reutilizado si hay un método adecuado para ello. En el caso de las zonas agrarias, tanto el ganado como los cultivos producen un residuo de materia sobrante que no puede ser comercializado. Este residuo es conocido como biomasa y si se trata adecuadamente en biodigestores puede producir biogás que es hábil de emplearse para generar energía, mecánica, eléctrica o térmica. La energía térmica es la que nos interesa en este proyecto. Además del biogás, en los biodigestores se genera otro material que es un gran abono ecológico, que podría ser usado a su vez para producir una mayor cantidad de cultivos.

El avance tecnológico producido en el ámbito agrario, tanto en la maquinaria de cosechas como en los procesos de transformación y manejo de la biomasa, ha propiciado un escenario de disponibilidad de conocimientos y equipos capaces de producir una gran cantidad de biogás. Éste puede ser empleado tanto en usos industriales o en climatización de edificios a gran escala como para usos domésticos, a pequeña escala.

Es ampliamente conocido el proceso que se lleva a cabo en un refrigerador por absorción, dado que la tecnología se desarrolló a mediados del siglo XIX y la patente existe desde 1860. A pesar de tener el conocimiento, el sistema ha tenido poca difusión debido entre otras causas, al hecho de obtener valores del coeficiente de operación (COP) inferiores a los de los sistemas convencionales de compresión.

La principal ventaja de la refrigeración por absorción, es que no requiere de una fuente de energía eléctrica para su aprovechamiento. Este aspecto es de gran valor en Bolivia, dado que carece de una red eléctrica que abastezca a la totalidad de la población por vivir en zonas aisladas a donde sería muy costoso extenderla.

Este tipo de refrigeración suele realizarse con gas natural (GN) o con gases licuados del petróleo (GLP), dado que el biogás no se ha empezado a explotar hasta que la ausencia de combustibles fósiles no lo ha requerido. Por otra parte, el beneficio más apreciable del uso de biogás es el reemplazo de estos combustibles, que conllevaría una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, y con ello retrasar el cambio climático. El biogás no está carente de gases como el CO<sub>2</sub>, pero la cantidad emitida por el proceso de obtención y su uso es el que genera la biomasa que se emplea. Se puede decir que la biomasa y el

biogás tienen emisiones de CO<sub>2</sub> nulas, dado que esas emisiones se producirían de igual manera por los residuos empleados.

El uso que más nos va a interesar en el presente proyecto es el doméstico, más concretamente para la producción de frío, en refrigeradores que emplean la tecnología de absorción. Como se ha mencionado con anterioridad y se indica en el título del proyecto, el principal motivo de este estudio es conocer el posible desarrollo de esta tecnología para su aprovechamiento en regiones carentes de energía eléctrica, tan extensas en Bolivia.

A lo largo del documento, trataremos el empleo del biogás producido en la planta de la Universidad Mayor de San Simón como fuente de energía. Este gas no ha sido tratado adecuadamente para su explotación. El proceso de refrigeración ya se ha realizado experimentalmente con resultados satisfactorios, pero sin un estudio apropiado del proceso.

## 1.1. ANTECEDENTES

La matriz energética primaria de Bolivia tiene una variada estructura de fuentes que, según el informe de la programación de mediano plazo en el periodo comprendido entre mayo de 2001 y abril de 2015, de la Comisión Nacional de Electricidad, se reparte de la siguiente manera:

- 58'9% Termoeléctrica
- 39'3% Hidroeléctrica
- 1'7% Energía alternativa (Energías renovables)

En Bolivia, debido a la subvención que hay sobre el precio del carburante, éste está congelado en 0'54 US\$/l para gasolina, o sea 3'74 Bs/l y el diesel en 3'72 Bs/l. Estos precios son los que tiene el carburante para el consumidor final, mientras que las grandes empresas destinadas a la generación termoeléctrica tienen precios inferiores. El bajo costo de esta materia prima ha impulsado en gran medida el uso de la energía termoeléctrica, que causa grandes problemas ambientales en el país.

El incremento de la demanda energética que sufre Bolivia requiere un aumento en la producción, y llevar a cabo este aumento mediante procesos convencionales puede ser altamente perjudicial para el futuro del paisaje. Es por ello que se deben impulsar medidas de diversificación de la generación energética, incluyendo las fuentes de energía renovables.

Dado que en la actual situación es muy costoso extender la red eléctrica de la que consta Bolivia, y como la demanda de las poblaciones más desfavorecidas es creciente, debe hallarse el modo de cubrir la misma. Una de estas demandas es la refrigeración, tanto de alimentos como de vacunas. Las regiones más aisladas son también las más castigadas por las enfermedades, al no poder llevar a cabo campañas de vacunación. Muchas requieren temperaturas inferiores a la ambiente para ser transportadas o almacenadas correctamente, lo que implica la necesidad de refrigeradores en las regiones a tratar.

Esta refrigeración puede llevarse a cabo mediante la tecnología de absorción, puesto que no requiere de electricidad. La refrigeración por absorción se basa en la compresión por el aumento de la temperatura del fluido refrigerante, para hacer que la presión se eleve y al descomprimirse se produce la bajada de la temperatura. Es necesario el uso de un fluido

disolvente para el proceso, y al tener distinta temperatura de ebullición se separarán al elevar la temperatura. El aporte de temperatura necesario puede provenir de muchas fuentes distintas, la combustión de una gran cantidad de materiales o el calor residual de otra etapa.

El biogás, procedente de la biomasa, es uno de los combustibles que pueden emplearse con este fin. La biomasa es un vector energético de gran importancia, tanto en el propio ámbito energético como en el ambiental. El uso de biodigestores para transformar la biomasa en biogás no genera únicamente este gas, sino también un fertilizante de beneficiosas características, así como el hecho de deshacerse de residuos que debieran ser tratados de algún modo.

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Es bien conocido que la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. La materia es una forma de almacenamiento de energía, con una gran capacidad. Así, la biomasa contiene grandes cantidades de energía que puede aprovecharse con su incineración directa o tras producir biogás.

La sociedad actual crece aceleradamente, y con ella sus necesidades. A nivel mundial la producción de frío, ya sea para refrigeración de alimentos como para aires acondicionados requiere el 15% de la energía eléctrica generada, y en el sector doméstico este porcentaje se eleva hasta el 40% [1]. Se estima que aproximadamente 1.600 millones de personas no tienen acceso a energía eléctrica para poder satisfacer sus necesidades básicas como la iluminación, la refrigeración de alimentos o actividades relacionadas con la salud.

Como se indica en el Plan de Universalización de Bolivia con Energía, la estimación actual del área rural de Bolivia con hogares sin acceso a servicio eléctrico es del 47%, es decir, 417.790 hogares. La mayoría de estos, se encuentran en zonas aisladas y con una gran dispersión entre ellas, lo que impide la ampliación de la red del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y en los Sistemas Aislados.

La industrialización trae consigo un mayor consumo de recursos y de energía, que ocasiona un gran impacto en el medio ambiente, como por ejemplo la destrucción de la capa de ozono o el calentamiento global. El uso de biogás, contribuye en gran medida a la reducción de emisiones de dióxido de carbono. Debido a que la creación de CO<sub>2</sub> en el biodigestor, es igual a la que se produciría por la degradación de la biomasa.

El funcionamiento de los sistemas de absorción no requiere de energía eléctrica, la necesaria para el proceso se suministra en forma de calor. La refrigeración por absorción se basa en la afinidad que tienen ciertas sustancias entre sí, para favorecer la absorción química. Estas sustancias son afines, pero tienen distintos puntos de ebullición, lo que facilita su separación al calentar la mezcla. El refrigerante es la sustancia más volátil, en el caso de emplear amoníaco-agua, el amoníaco (NH<sub>3</sub>) actúa como refrigerante y el agua (H<sub>2</sub>O) es el medio de transporte que absorbe al refrigerante.

La refrigeración por absorción empleando biogás, es una buena opción para solventar los problemas comentados anteriormente, se reduce la contaminación, no requiere de combustibles fósiles y no es necesario extender la red eléctrica a zonas aisladas del país. El uso del biogás producido en las propias áreas aisladas reduce el costo de usar combustibles

de otro tipo y al mismo tiempo reduce la emisión de gases de efecto invernadero. Al mismo tiempo, si el refrigerador es de absorción no precisa de electricidad para funcionar, reduciendo también así el gasto. Además de lo anterior se debe mencionar que los sistemas de refrigeración por absorción producen menos ruido y vibraciones que los convencionales, lo que implica un menor mantenimiento y aumenta la fiabilidad.

### 1.3. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DEL BIOGÁS

La digestión anaeróbica de biomasa para la producción de biogás es un proceso que consiste en la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. Para producir metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), es necesario que ocurran ciertas reacciones bioquímicas gracias a la presencia de una gran variedad de microorganismos. El proceso de digestión proporciona una alternativa viable a la emisión de residuos de categoría 3 (que incluyen residuos alimenticios industriales, domésticos y algunos residuos de mataderos).

La biomasa es una materia prima prometedora para la digestión anaeróbica. Las hiervas, incluyendo la paja de trigo, arroz, y zaína, son un abundante suministro de biomasa, la mayoría de lo cual es producto residual de la producción de alimentos. Una alta proporción de material rebelde, frecuentemente requiere de pre-tratamientos para obtener la totalidad de emisiones potenciales. La época de recolección puede además afectar significativamente al biogás generado por las plantas. Las variedades de maíz producen entre un 9% y un 37% mejores emisiones de metano en 97 días de estancia, comparado con estancias de 151 días.

Se reconocen cuatro tipos generales de bacterias con funciones catabólicas sobre el carbono, que toman parte del proceso de degradación de materia orgánica en metano. Estos son los tipos y sus funciones:

- **Acetogénicas:**  
Producen hidrógeno y catabolizan ciertos ácidos grasos y productos finales neutros.
- **Hidrolíticas:**  
Catabolizan lípidos, proteínas, sacáridos y otros constituyentes.
- **Homoacetogénicas:**  
Catabolizan compuestos monocarbonados y/o hidrolizan compuestos multicarbonados para producir ácido acético.
- **Metanogénicas:**  
Catabolizan compuestos monocarbonados para producir metano. Este tipo de bacterias pueden clasificarse en cuatro géneros: metanobacterium, methanococcus, methanospirium y methanosarcina.

Para que el proceso de fermentación tenga los resultados deseados, es preciso que trabajen de forma conjunta bacterias que producen metano y otras que no lo hagan. Si algún tipo de bacterias se encuentra en exceso o ausente, se pierde el equilibrio cinético que puede llegar a provocar el fracaso del proceso.

La mayor ventaja del uso de la digestión anaerobia radica en que, el dióxido de carbono obtenido se considera neutro en cuanto a gases invernadero se refiere. Esto se debe a que el

CO<sub>2</sub> ha sido absorbido de la atmósfera por las plantas que dan origen a la biomasa durante su crecimiento, para posteriormente ser emitido como parte del ciclo del carbono. Al realizarse la digestión en un entorno controlado, se evitan también emisiones de gases perjudiciales para la atmósfera y olores desagradables de la descomposición.

A este hecho debe sumársele que una parte de la biomasa empleada para producir el biogás, procede de desechos que de no tomar como sustento debería ser eliminado adecuadamente. Esto convierte un residuo en un recurso, dando un mayor valor al producto obtenido. Dado que la biomasa consumida es un recurso que puede fácilmente obtenerse en cualquier parte del territorio, tiene una incidencia económica y social muy importante en el ámbito rural, y la dependencia de combustibles fósiles decrece.

## USOS DEL BIOGÁS

El biogás tiene usos diversos, se trata de un gas con gran capacidad calorífica al ser quemado. Es por esto que se emplea tanto a pequeña escala como en distintas industrias. A continuación se muestran los consumos y rendimientos de ciertos usos en que se utiliza el biogás.

Tabla 1-1. Usos del biogás

Aparato	Consumo	Rendimiento [%]
Heladera (100 l)	30 – 75 l/h	20 – 30
Motor a gas	0'5 m <sup>3</sup> /kWh	25 – 30
Lámpara de mantilla (60 W)	120 – 170 l/h	30 – 50
Quemador de cocina	300 – 600 l/h	50 – 60
Quemador (10 kW)	2 m <sup>3</sup> /h	80 – 90
Cogenerador	1 kWe	hasta 90
Infrarrojo (200 W)	30 l/h	95 – 99

Para poder usar aparatos convencionales que emplean gas como combustible, generalmente se debe agrandar el grosor del paso del gas. En las cocinas y los calentadores realizar esta modificación es sencillo y dado que estos dispositivos se usan mucho a lo largo de la geografía boliviana, su desarrollo a gran escala tiene mucho interés.

En el caso de los quemadores infrarrojos la alta eficiencia es su mayor ventaja, por lo que se reduce la cantidad de gas requerida. A este uso se le contrapone el de las lámparas de mantilla que además de tener una baja eficiencia, ésta depende del ambiente en que son utilizadas porque generan un calor que debe ser disipado.

Los refrigeradores y heladeras son uno de los usos con mayor interés para la aplicación directa del biogás. Su consumo apenas varía a lo largo del día, por lo que puede instalarse sin necesidad de un almacenaje del gas, reduciendo los costos de inversión.

El biogás puede utilizarse también en motores de combustión interna, tanto los de ciclo Otto como los de ciclo Diesel. El octanaje del biogás, dependiendo de su composición, ronda entre 100 y 110. Este valor es muy apropiado para su uso en motores de alta relación volumétrica de compresión, pero tiene una baja velocidad de encendido, que para determinados usos desaconseja su utilización.

Los sistemas de cogeneración utilizan el biogás en un motor de combustión interna, normalmente para generar energía eléctrica mediante un generador. Tras la combustión, los gases calientes salientes de la cámara se hacen pasar por un intercambiador de calor, para recuperar parte de su energía térmica.

### 1.3.1. COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS

El biogás está constituido por una gran variedad de gases. El principal componente es el metano ( $\text{CH}_4$ ), seguido por el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el hidrogeno, y finalmente trazas de otros elementos cuya concentración depende del material que se ha empleado para la producción del biogás. La concentración de cada elemento puede variar, como se muestra a continuación.

Tabla 1-2. Composición del biogás

Sustancia	Concentración [%]
Metano	50 – 70
Dióxido de carbono	30 – 40
Hidrógeno	5 – 10
Nitrógeno	1 – 2
Vapor de agua	0'3
Ácido sulfhídrico	Trazas

Debido a estas diferencias, la mayor parte de las propiedades del biogás también deben ser expresadas en unos varemos, mientras que para otras se indica un valor promedio de los más comunes. Así, las propiedades de energía contenida, límite de explosión o presión crítica entre otras se indican en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3. Propiedades del biogás

Propiedad	Valores usuales
Energía contenida	6'0 – 6'5 kWh/m <sup>3</sup>
Equivalente en combustible	0'60 – 0'65 l petróleo/m <sup>3</sup> biogás
Límite de explosión	6 – 12% biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750 ° C
Temperatura crítica	-82'5 ° C
Presión crítica	75 – 89 bar
Densidad normal	1'2 kg/m <sup>3</sup>
Masa molar	16'043 kg/kmol
Olor	Huevos en mal estado

Además de las sustancias mencionadas en la Tabla 1-2, también pueden encontrarse en el biogás trazas de siloxenos y partículas sólidas flotantes. Los siloxenos provienen de la silicona y en el biogás se presentan como grupos separados. Es muy habitual encontrar siloxenos en los desechos domésticos, ya que se encuentran principalmente en cosméticos, detergentes materiales de construcción o tintas de impresión.

### PRINCIPIO DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS

Para obtener energía térmica de la combustión del biogás, éste debe mezclarse con aire de modo que los componentes reaccionen con oxígeno. Esta combustión puede realizarse



en una gran cantidad de artefactos distintos y los componentes resultantes de la combustión son principalmente, vapor de agua y dióxido de carbono.

Las reacciones más importantes que suceden en la combustión son las siguientes:



Éstas son las que ocurrirían si la cantidad de oxígeno fuese la estequiométrica, y para asegurar que la cantidad de  $\text{O}_2$  es suficiente se aumenta el aire introducido en las cámaras de combustión. Esto se controla aumentando la presión del aire introducido.

### 1.3.1.1. PROPIEDADES DEL METANO

Todos los gases, sin excepción, tienen unas características propias que se ven alteradas al mezclarse con otros gases. En el biogás cohabitan más de uno, y como el componente principal es el metano, las características del gas serán más próximas a las de esta sustancia que al resto. Es por eso que se muestran a continuación algunas características esenciales del metano.

Tabla 1-4. Puntos particulares del metano

Punto	Temperatura [°C]	Temperatura [K]	Presión [bar]	Densidad [kg/L]
Crítico	-82,59	190,56	45,98	0,1620
Ebullición	-161,52	11,63	1,013	0,4226
Triple	-182,47	90,68	0,117	-

Hay una gran cantidad de gases que contienen metano, el más conocido de ellos es el biogás, que tiene muchas variantes en función del lugar de origen, la composición química y su razón de elementos químicos. Estas diferencias repercuten en las propiedades del gas y radican en el contenido de metano, el índice de Wobbe y el poder calorífico.

El índice de Wobbe es un valor que describe la cantidad de gas, relacionado con los límites superior e inferior del valor calorífico del metano. Los índices superior e inferior de Wobbe se calculan con las ecuaciones 1-4 y 1-5:

$$W_s = \frac{PC_s}{\sqrt{\rho}} \quad 1-4$$

$$W_i = \frac{PC_i}{\sqrt{\rho}} \quad 1-5$$

En donde:  $W_s$  = Índice de Wobbe superior  
 $W_i$  = Índice de Wobbe inferior  
 $PC_s$  = Poder calorífico superior  
 $PC_i$  = Poder calorífico inferior  
 $\rho$  = Densidad relativa del gas

El valor energético del biogás depende en gran medida de la cantidad de metano que contenga. Suele tener valores comprendidos entre 20 y 25 MJ/m<sup>3</sup>, mientras que el valor energético del gas natural se encuentra entre 33 y 38 MJ/m<sup>3</sup>. Si se desea aumentar el valor del biogás debe limpiarse de las sustancias que no añaden valor, como el dióxido de carbono.

### 1.3.1.2. EFECTO DE LOS COMPONENTES EN EL COMPORTAMIENTO

Las sustancias que componen el biogás le afectan a éste de distinta manera. Su comportamiento depende de la proporción de las mismas, así como el efecto que pueda tener el paso del gas a través de los equipos usados. La Tabla 1-5 resume el efecto de cada sustancia.

Tabla 1-5. Efecto de los componentes en el biogás

Sustancia	Proporción	Efecto
CO <sub>2</sub>	30 – 40%	Disminución del poder calorífico
		Incremento de la cantidad de metano
		Corrosión de los equipos
		Daño de las celdas alcalinas de combustible
Vapor de agua	1 – 5%	Corrosión de equipos y piping
		Daños de instrumentación por condensado
		Riesgo de congelación y bloqueo de tuberías y válvulas
N <sub>2</sub>	0 – 5%	Disminución del poder calorífico
H <sub>2</sub> S	0 – 0'5%	Corrosión de los equipos y piping
		Emisiones de SO <sub>2</sub> tras la combustión
		Emisiones de H <sub>2</sub> S en combustión imperfecta
		Inhibición de la catálisis
NH <sub>3</sub>	0 – 0'05%	Emisión de NO <sub>x</sub>
		Daño de las celdas de combustibles
Siloxenos	0 – 50 mg/m <sup>3</sup>	Abrasión y daño en los motores
Polvo	> 5 µm	Bloqueo de las boquillas y celdas de combustibles

### DIÓXIDO DE CARBONO

La presencia de CO<sub>2</sub> en el digestor, es esencial para la formación de metano durante el proceso, por lo que no es un objetivo deshacerse de él hasta que no se extraiga el gas final. La cantidad de dióxido de carbono se mide con la razón CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> en porcentaje de volumen. El dióxido de carbono es el segundo componente más presente en el biogás, y la composición del mismo viene afectada por los siguientes factores:

- Largas cadenas de hidrocarburos presentes en los compuestos mejoran la calidad del gas producido, sin afectar a la acidez.
- Por regla general, la descomposición anaeróbica del sustrato mejora cuanto más avanzado sea el periodo de retención. La cantidad de metano presente en el digestor aumenta en gran medida cuando el dióxido de carbono producido desactiva el proceso de hidrólisis.
- La homogeneidad del sustrato en el digestor disminuye el tiempo necesario para que el proceso de fermentación comience.
- Una carga con una gran cantidad de líquido reduce la concentración de CO<sub>2</sub> en el gas debido a que éste quedará disuelto en el agua.

- El incremento de la temperatura del digestor reduce la cantidad de  $\text{CO}_2$  disuelto en el líquido.
- La alta presión provoca un incremento de dióxido de carbono disuelto. En caso de desear eliminar  $\text{CO}_2$ , puede purgarse parte del líquido una vez que el proceso de proliferación bacteriana haya comenzado.

## NITRÓGENO Y OXÍGENO

Si el circuito de tuberías del sistema no está perfectamente soldado y se pierde la hermeticidad, estos gases pueden entrar en el digestor. También pueden incorporarse de forma predeterminada durante las etapas de ventilación.

La introducción de nitrógeno y oxígeno en el biogás se realiza con el fin de eliminar el ácido sulfhídrico indeseado del reactor. Para lograr este efecto, la relación de  $\text{N}_2$  y  $\text{O}_2$  se encuentra habitualmente en una proporción 4 a 1.

## ÁCIDO SULFHÍDRICO

La concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en el biogás depende mayoritariamente del proceso que se ha utilizado para su obtención y el sustrato utilizado. Si éste es de una viscosidad más elevada, la concentración de ácido sulfhídrico es menor. En caso de no existir un proceso de des-sulfurización la concentración puede llegar a superar el 0'2% en volumen.

No permitir que el contenido de ácido alcance unos niveles elevados es una necesidad de vital importancia, dado que los componentes que entren en contacto con el gas sufrirán corrosión. Para evitar el daño de los equipos suele realizarse una des-sulfurización en el interior del propio reactor. Si se realiza un proceso previo, puede mantenerse el nivel inferior a  $310 \text{ mg/m}^3$  con excretas líquidas o  $70 \text{ mg/m}^3$  si se usan co-sustratos. A pesar de estos tratamientos los niveles de  $\text{H}_2\text{S}$  son elevados.

El ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) que puede encontrarse en el biogás proviene de una reacción entre el sulfuro de hidrógeno y el vapor de agua. Este ácido puede ser nocivo para equipos en los que se desee utilizar el biogás, por lo que resulta de gran necesidad la reducción de sulfuro de hidrógeno si éste supera el 2% en volumen del reactor [2].

Existen sistemas de filtro con sustancias como; cal, limadura de hierro o algunos tipos de tierras (hematites parda o limonita) ricas en sustancia ferrosa, capaces de reducir el porcentaje de  $\text{H}_2\text{S}$  en el biogás. La efectividad y la capacidad de absorción está relacionada con la cantidad de hierro que contenga la sustancia utilizada, así una masa que contenga entre 5 y 10% de hidróxido de hierro ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ) es capaz de absorber 15 gramos de sulfuro por kilo de sustancia. Los filtros pueden ser reutilizados tras regenerarlos poniéndolos en contacto con aire. Con regeneración, la masa antes mencionada puede llegar a absorber hasta 150 gramos de sulfuro por kilo de sustancia.

Una alternativa al método anterior son los biofiltros de lecho fijo, donde la fase móvil del sistema es el gas y la fija la biomasa sostenida por un soporte orgánico/sintético. Es un método muy utilizado porque sus costos; de operación, material y la cantidad de agua consumida son bajos, además de tener una alta eficiencia en la eliminación de distintos contaminantes y no generar lodos o aguas corrompidas. Frente a ello se encuentra el poco

control que se tiene, ante fenómenos de reacción, el valor de pH, el taponamiento del filtro por un exceso de biomasa y la gran cantidad de espacio que requiere.

## AMONÍACO

La concentración normal de amoníaco en el biogás no suele superar los  $0'1 \text{ mg/m}^3$ , salvo en los casos en los que el sustrato tiene gran cantidad de excrementos de aves o basuras muy particulares. Si esto ocurre, la concentración puede llegar a alcanzar los  $1'5 \text{ mg/m}^3$ . Este límite no debe superarse, ya que puede ser perjudicial para los quemadores o los motores en que se produzca la combustión del gas.

## SILOXENOS

Una concentración aceptable de siloxenos en la quema de un biogás es de  $0'2 \text{ mg/m}^3$ . Tras su combustión se forma  $\text{SiO}_2$ , que se deposita en la superficie de la maquinaria y puede producir abrasión en la superficie de los pistones de los motores.

### 1.3.2. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Varios factores influyen, en mayor o menor medida, a la producción de biogás en un biodigestor. Los más característicos son: el tipo de material, la temperatura, la carga, el tiempo de retención, la acidez, la relación carbono/nitrógeno (C/N) y otros que también se mencionarán a continuación.

#### 1.3.2.1. MATERIAL DE CARGA PARA LA FERMENTACIÓN

Se utiliza el nombre “material de carga” para referirse a todos los desechos orgánicos introducidos en un biodigestor con el fin de degradarlos para formar biogás. Para llevar a cabo la fermentación, es necesario que los microorganismos metanogénicos tengan a su alcance los nutrientes necesarios para producir el biogás, por lo que la cantidad de material de carga ha de ser suficiente para que el proceso no se interrumpa.

Tabla 1-6. Producción de biogás de distintos tipos de estiércol

Tipos de estiércol	Producción de biogás [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]
Vacuno	$0'023 - 0'040$
Cerdos	$0'040 - 0'059$
Aves corral	$0'065 - 0'116$
Humano	$0'020 - 0'028$

El proceso no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno para generar biogás, también un equilibrio de sales minerales como azufre, calcio, cobalto, fósforo, hierro, magnesio, manganeso, molibdeno, níquel, potasio, selenio, tungsteno, zinc y otros menores.

Es habitual que los excrementos y los lodos provenientes de las cloacas presenten estos elementos en proporciones aceptables. Por el contrario, algunos residuos industriales pueden requerir de la adición de esos compuestos o un post-tratamiento aeróbico para realizar su digestión.

Se descubrió a finales la década de los 70 y principios de los 80, que una gran cantidad de sustrato rico en carbohidratos requiere de otros, con los que hacer la codigestión o la adición de barreras alcalinas para asegurar la estabilidad del proceso.

### 1.3.2.2. TEMPERATURA

Es un factor de vital importancia para el proceso anaeróbico, siendo limitante a la hora de seleccionar el lugar de ubicación del digestor, en altitud y/o en latitud. Es imprescindible para llevar a cabo el proceso de digestión que la temperatura sea superior a los 4 °C.

Tabla 1-7. Rendimiento de la producción de gas a distintas temperaturas

Material de carga	Temperatura [°C]	Producción de gas [ $\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{día}$ ]
Paja de arroz + estiércol	29 – 30	0'55
Porcino + pastos	24 – 26	0'21
	16 – 20	0'10
	12 – 15	0'07
	menos de 8	Escasa

El factor de la temperatura está estrechamente ligado al de tiempo de retención y la degradación de la biomasa en el digestor. Esta relación es inversamente proporcional, es decir, que a mayor temperatura menor tiempo de estancia, lo que consecuentemente influye en una reducción del volumen de reactor para una misma cantidad de biomasa.

Tabla 1-8. Producción de gas en distintos rangos de temperatura

Materiales	Mesofílico (35 °C)	Ambiente (8 – 25 °C)
Estiércol de vaca	0'30	0'20 – 0'25
Paja de arroz	0'40	0'20 – 0'25
Estiércol de cerdo	0'42	0'25 – 0'30
Estiércol de humano	0'43	0'25 – 0'30
Pasto verde	0'44	0'20 – 0'25
Paja de trigo	0'45	0'20 – 0'25

Se considera que este factor es el de mayor potencia para aumentar la eficiencia del sistema, principalmente referido al saneamiento. Para aumentarla, basta con elevar la temperatura del efluente, haciendo circular agua caliente por un serpentín que recorra la cámara de fermentación, o colocando bujías de calentamiento. Este segundo método no es tan efectivo porque no distribuye la temperatura de forma uniforme.

### 1.3.2.3. VELOCIDAD DE CARGA

Esta velocidad mide la cantidad de sustrato orgánico incorporado en un periodo de tiempo al biodigestor. Por lo general esta cantidad se representa por día y puede medir los kilogramos de material total, de materia seca o de sólidos volátiles y deben ir referidos al volumen del digestor en metros cúbicos ( $\text{kg materia/día} \cdot \text{m}^3$ ;  $\text{kg materia seca/día} \cdot \text{m}^3$ ;  $\text{kg sólidos volátiles/día} \cdot \text{m}^3$ ).

Es importante tener en cuenta la dilución que se utiliza en el proceso, dado que una misma cantidad de materia puede llevar consigo diferentes volúmenes de agua.

#### 1.3.2.4. TIEMPO DE RETENCIÓN

Como se ha mencionado en ellos, el tiempo de retención está íntimamente ligado a los factores de tipo de sustrato y temperatura del proceso.

La optimización de temperatura y tiempo de retención vendrá determinada por la relación beneficio/costo, ya que los volúmenes, los sistemas de control, la calefacción de la biomasa y la eficiencia del proceso cambian.

Tabla 1-9. Tiempos de retención de las excretas

Materia prima	Tiempo de retención [días]
Estiércol porcino líquido	15 – 25
Estiércol vacuno líquido	20 – 30
Estiércol aviar líquido	20 – 40

#### 1.3.2.5. ACIDEZ

El valor de pH para una digestión metanogénica debe oscilar entre 6'5 y 7'5, un valor neutro de acidez. Si el pH baja de 5 o excede 8 el proceso de fermentación puede ser inhibido o incluso detenido por completo.

Esta oscilación puede controlarse por sí sola en muchos casos. La regulación se debe a los efectos buffer producidos por los compuestos bicarbonato-dióxido de carbono ( $\text{HCO}_3^-$ - $\text{CO}_2$ ) y amonio-amoniaco ( $\text{NH}_4^+$ - $\text{NH}_3$ ).

También puede estabilizarse el valor de la acidez de forma manual, si el proceso no es capaz de hacerlo por sí solo. Para ello basta con sacar frecuentemente pequeñas cantidades de materia y añadiendo efluente fresco en igual cantidad y simultáneamente. Además, si el pH es muy bajo puede añadirse agua amoniacal diluida, ceniza, fertilizante o una mezcla de éstos.

#### 1.3.2.6. CONTENIDO DE SÓLIDOS

Las bacterias metanogénicas ven reducida su movilidad en el sustrato a medida que el contenido en sólidos es mayor, lo que puede afectar en gran medida a la eficiencia y la producción de gas en el digestor.

A pesar de no haberse obtenido hasta el momento un método de cálculo suficientemente preciso para saber la relación óptima de sólidos en el digestor, pero mediciones empíricas han determinado que el porcentaje óptimo se encuentra entre el 8 y el 12%.

Estas mediciones se realizaron utilizando, mezclas de estiércoles animales en agua. Lo habitual en las mezclas es que el 17% del estiércol vacuno sean sólidos, mientras que en el porcino es del 18%, por lo que debe sumársele agua para reducir esas cantidades hasta entrar en el baremo del óptimo.

Tabla 1-10. Contenido de sólidos totales

Materiales	Contenido seco [%]	Contenido hídrico [%]
Paja de arroz	83	17
Paja de trigo seca	82	18
Tallo de maíz	80	20
Pasto verde	24	76
Excretas humanas	20	80
Estiércol de cerdo	18	82
Estiércol de vaca	17	83
Orina de vaca	0'6	99'4
Orina humana	0'4	99'6
Orina de cerdo	0'4	99'6

### 1.3.2.7. INCLUSIÓN DE INOCULANTES

La reproducción inicial de las bacterias, lleva un tiempo que puede verse acortado si se incluye en el digestor una cantidad determinada de material que haya pasado por otro digestor, que esté trabajando a plena actividad. Este proceso es de muy útil en los biodigestores discontinuos que son detenidos y arrancados con frecuencia.

Se deben considerar dos factores a la hora de inocular lodos en un biodigestor: la proporción en que se agregan y la edad de los lodos. A mayor proporción y menor edad, mayor eficiencia se obtiene, como se muestra en la gráfica siguiente.

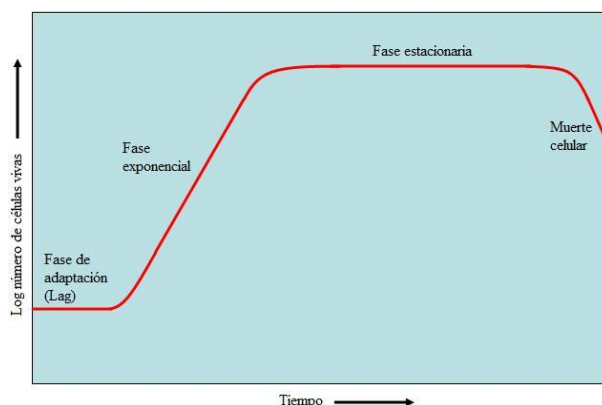


Figura 1-1. Curva de crecimiento bacteriano

### 1.3.2.8. AGITACIÓN Y MEZCLADO

La agitación se lleva a cabo con los siguientes objetivos:

- Remocionar los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas
- Mezclar la población bacteriana del sustrato antiguo con el sustrato nuevo
- Evitar posibles costras de sustrato en el interior del digestor
- Homogeneizar la densidad bacteriana del digestor
- Evitar espacios en los que no se produzca actividad biológica

Para realizar el mezclado existen distintos tipos de agitadores, que son los mostrados en la imagen siguiente.



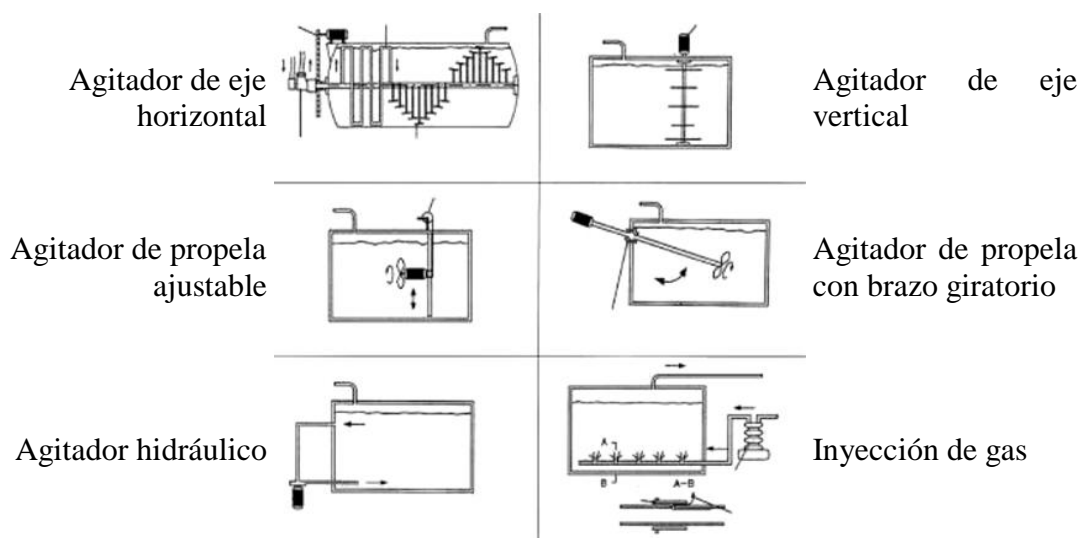


Figura 1-2. Tipos de agitadores

### 1.3.2.9. RELACIÓN CARBONO/NITRÓGENO

C/N es la abreviatura de la relación Carbono/Nitrógeno. El valor óptimo de esta relación se encuentra entre 20 y 30, es decir, que debe haber entre 20 y 30 veces más de carbono que de nitrógeno en la materia orgánica. Las excretas humanas y animales son ricas en nitrógeno, teniendo esta relación valores inferiores a 25, por lo que la velocidad de degradación será buena y se generará una gran cantidad de gas.

Tabla 1-11. Relación C/N

Materias primas	Carbono en peso [%]	Nitrógeno en peso [%]	Relación carbono/nitrógeno
Paja seca de trigo	46	0'53	87
Paja seca de arroz	42	0'64	67
Paja seca de maíz	40	0'75	53
Hojas secas	41	1'00	41
Estiércol de aves	41	1'30	32
Estiércol fresco de oveja	16	0'55	29
Pasto	14	0'54	27
Estiércol fresco de vaca	7'3	0'29	25
Estiércol fresco de caballo	10	0'42	24
Cacahuets tallos y hojas	11	0'59	19
Estiércol fresco de cerdo	7'8	0'60	13
Excretas frescas humanas	2'5	0'85	2'9

Por lo general, las materias primas con relaciones altas producen una mayor cantidad de gas, pero con una velocidad de producción menor que aquellas con relaciones más bajas. Los digestores que constan con materia prima más nitrogenada generan en los primeros 10 días entre el 35 y el 45% del gas total, mientras que las materias ricas en carbono generan en torno al 9%.

En caso de que la relación fuese excesivamente alta, el nitrógeno sería consumido con demasiada prontitud por las bacterias metanogénicas, para satisfacer su necesidad de proteínas. Esto llevaría a que el resto del carbono no reaccionaría y por ello la cantidad de gas producido sería menor. Por el contrario, si la relación fuese muy baja, el nitrógeno que



no reaccionase con el carbono se liberaría formando amonio ( $\text{NH}_4$ ). El amonio provoca en el contenido del biodigestor un aumento del pH, que en caso de superar los 8'5 intoxicaría a la población metanogénica.

Para que el rendimiento a lo largo del ciclo sea lo más constante posible, se deben combinar cantidades adecuadas de materiales con altas y bajas relaciones. Para calcular la relación C/N se emplea la siguiente ecuación:

$$K = \frac{C_1X_1 + C_2X_2 + \dots}{N_1X_1 + N_2X_2 + \dots} = \frac{\sum C_iX_i}{\sum N_iX_i} \quad 1-6$$

En donde: K = Relación C/N  
 $C_i$  = Porcentaje de carbono  
 $X_i$  = Peso de la materia prima  
 $N_i$  = Porcentaje de nitrógeno

#### 1.3.2.10.PROMOTORES

Los promotores son productos que fomentan la degradación del efluente aumentando la producción de gas. Al igual que con los inoculantes, añadir celulosa al cargar el digestor es útil para promover el proceso y la producción del biogás.

Existe variedad de productos promotores de la fermentación, entre los que se encuentran encimas, sales inorgánicas. La urea y el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) son otros promotores que han dado buenos resultados; la urea acelera la degradación del material y como consecuencia, la producción de metano, el segundo provoca una mayor degeneración de gas con mayor contenido en metano.

#### 1.3.2.11.INHIBIDORES

Tabla 1-12. Concentración necesaria de los inhibidores

Inhibidores	Concentración inhibidora
Sulfato ( $\text{SO}_4$ )	5.000 ppm
Sal ( $\text{NaCl}$ )	40.000 ppm
CN	0'025 mg/ml
Nitrato ( $\text{NO}_x$ )	0'050 mg/ml
Cobre (Cu)	0'100 mg/ml
Cromo (Cr)	0'200 mg/ml
ABS (Detergente sintético)	0'02 – 0'04 mg/ml
Níquel (Ni)	0'20 – 0'50 mg/ml
Magnesio (Mg)	1'00 – 1'50 mg/ml
Potasio (K)	2'50 – 4'50 mg/ml
Calcio (Ca)	2'50 – 4'50 mg/ml
Sodio (Na)	3'50 – 5'50 mg/ml

Al contrario que sucede con los promotores, la presencia de metales pesados, antibióticos y detergentes en la materia orgánica, a partir de ciertas concentraciones, puede inhibir el proceso fermentativo, pudiendo incluso llegar a interrumpirlo totalmente. Una excesiva concentración de amoníaco y de nitrógeno también destruye las bacterias del digestor.

#### 1.4. ANÁLISIS DEL REFRIGERADOR POR ABSORCIÓN

Según la 2ª ley de la termodinámica, en ningún caso el calor puede pasar de un cuerpo de temperatura inferior a otro de temperatura superior. De aquí se resuelve que la definición de enfriar, implica una evacuación de calor de un cuerpo a temperatura superior a la deseada. Es decir, que si se pretende extraer calor de un cuerpo cuya temperatura es inferior a la del ambiente que lo rodea, es necesario intercalar un proceso de frío.

La producción de frío puede llevarse a cabo mediante dos técnicas diferentes que comparten alguna característica: la compresión y la sorción, que a su vez se divide en absorción y adsorción.

La producción de frío se obtiene al provocar la evaporación de un fluido. Para ello se debe elevar su presión previamente, al reducirla nuevamente se provoca la evaporación y la refrigeración. Ambas técnicas producen esta compresión, la diferencia radica en el método de conseguirla. La técnica de compresión de vapor la realiza de forma mecánica aspirando el fluido del evaporador, mientras que en las técnicas de absorción y adsorción se produce una compresión térmica tras sorber el fluido refrigerante mediante un material apropiado para ello.

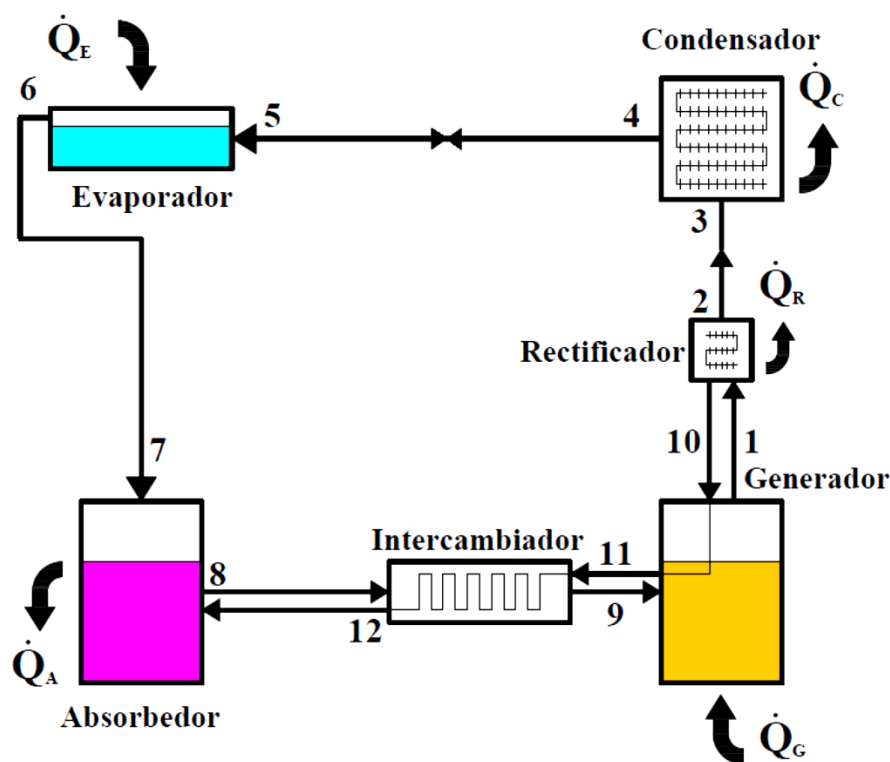


Figura 1-3. Sistema de refrigeración por absorción

Existe una gran variedad de definiciones que se han utilizado para expresar los sistemas de refrigeración por absorción y adsorción. En este documento los describiremos de la siguiente manera:

- **Absorción:**

En este sistema, el vapor del fluido refrigerante es solubilizado al interior de otro material, en el que se produce una reacción química. El material absorbente puede ser tanto líquido como sólido.

El sistema se basa en la afinidad fisicoquímica que tiene la pareja de compuestos empleados para la refrigeración, como por ejemplo el agua con el amoníaco o el bromuro de litio con el agua.

- **Adsorción:**

En este caso, la unión se produce únicamente por causas físicas, sin que ocurra ninguna reacción química posterior. Debido a este hecho, el resultado de la unión será un fenómeno superficial. Generalmente se emplea un sólido para realizar la adsorción del vapor, pero también puede ocurrir entre un líquido y un gas, aunque con menor frecuencia.

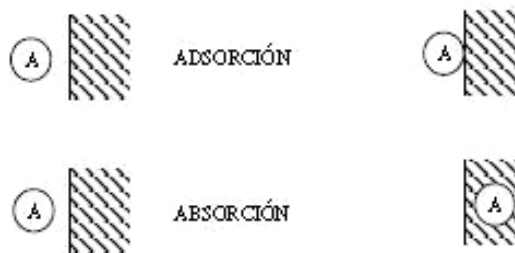


Figura 1-4. Procesos de adsorción y absorción

Para el desarrollo de este texto nos centraremos únicamente en el proceso de absorción dejando a un lado el sistema de adsorción.

#### 1.4.1. SISTEMA DE ABSORCIÓN

Pueden encontrarse desarrollos de sistemas de refrigeración por absorción desde 1845, año en el cual Edmund Carre diseñó, construyó y vendió una máquina que refrigeraba agua potable operando con una mezcla de agua y ácido sulfúrico. Algunos años más tarde, en 1851, su hermano, Ferdinand Carre, realizó un diseño exitoso de la primera máquina comercial de refrigeración por absorción que empleaba amoníaco y agua. En los años posteriores a estos trabajos, se hallaron numerosas mejoras para los sistemas, pero únicamente de manera empírica. Así fue hasta que en 1913 Edmund Altenkirch aportó una primera base teórica al respecto, sentando los principios de la termodinámica de mezclas binarias para la absorción. A partir de estos principios surgieron las primeras listas de los componentes cuyas características les permiten trabajar mezclados para la realización de los ciclos.

Tras la segunda guerra mundial comenzó una era de gran auge para la refrigeración por absorción, debido al uso de la mezcla bromuro de litio-agua. En estos años se desarrollaron y comercializaron equipos tanto para uso doméstico como unidades de gran capacidad. En 1945, Carrier vendió la primera unidad de gran potencia, que trabajaba con 530 kW; y en 1959, Trane introdujo el primer equipo hermético. Los coeficientes de operación de los ciclos con los que operaban estos equipos no eran precisamente buenos, dado que rondaban el 0'65. A pesar de ello, gozaban de una gran aceptación, impulsado en gran medida por el

bajo precio que el gas tenía en la época, y que el suministro de electricidad carecía de regularidad. En el sector de las grandes potencias llegaron a ocupar aproximadamente el 25% del mercado estadounidense durante la década de los 60. Al llegar la crisis del petróleo de la década siguiente, la energía nuclear se hizo fuerte en el sector, restringiendo en gran medida el interés que los usuarios tenían por los sistemas de refrigeración por absorción, y se centraron en los equipos de compresión accionados por energía eléctrica. En la misma década, y en contrapartida a lo sucedido en Estados Unidos, en Japón se apostó por la climatización a gas. Esto se debió a que Japón tenía escasos recursos naturales propios y contaba con una gran disponibilidad de gases licuados procedentes del sudeste asiático. En 1975, por primera vez los equipos de climatización por absorción instalados superaron a los equipos eléctricos, y una década después dominaban el 80% del mercado de grandes potencias.

En la actualidad, los sistemas de compresión siguen dominando el mercado, pero la creciente preocupación por el medio ambiente, está haciendo que la tecnología de absorción recupere parte de la cuota. Con el paso de los años, dicha tecnología ha evolucionado y crecido hasta llegar al día de hoy, consiguiendo la disponibilidad de una gran gama de productos con unas fiabilidades muy atractivas y unos rendimientos que anteriores máquinas no podían, ni aproximar.

La gran baza de los sistemas de refrigeración por absorción radica en la disminución de la tarifa eléctrica, en la posibilidad de valerse de calores residuales o fuentes de energía renovable, así como en el incremento de la eficiencia de los sistemas de cogeneración que valgan al mismo tiempo para la producción de electricidad, calor y frío, sin olvidar la protección del medio ambiente. Hasta la fecha, la inversión inicial que requieren los sistemas de absorción son tales, que la diferencia de costos de operación no compensa el gasto, debido a que cuestan alrededor del doble que los sistemas de compresión de vapor para la misma capacidad. Por ello, si se busca el éxito comercial del sistema de absorción es imperativo lograr la manera de producir unidades con equipos menos costosos [3].

## PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Algunos líquidos tienen la capacidad de absorber y desorber ciertos vapores, hecho del que se valen los ciclos de absorción para la generación de frío. El vapor empleado en los ciclos, es mucho más volátil que el fluido absorbente. Se denomina fluido o agente absorbente, al material que absorbe los gases de la sustancia que se evapora y produce el frío, también conocido como agente refrigerante. Como se comentará posteriormente, los pares de fluidos de trabajo más utilizados son: el amoníaco-agua y el agua-bromuro de litio, siendo el amoníaco y el agua los refrigerantes y el agua y el bromuro de litio los absorbentes, respectivamente.

Los equipos de absorción se basan en el principio de evaporación y condensación del fluido refrigerante para así obtener frío. La diferencia más notoria que se puede encontrar entre el ciclo de absorción y el de compresión de vapor, como ya se ha mencionado anteriormente, consiste en el proceso que sufre el fluido para pasar de la zona de baja presión a la de alta. Ambos modelos requieren de un aporte energético externo para llevar a cabo el ciclo y poder generar frío. Pero debido a la diferencia de proceso que se necesita para elevar la presión del refrigerante, el aporte energético también será distinto. Así, en la compresión, la energía será mecánica, utilizando un compresor ya sea eléctrico o de combustión; por el contrario, la energía del ciclo de absorción es puramente térmica [4].

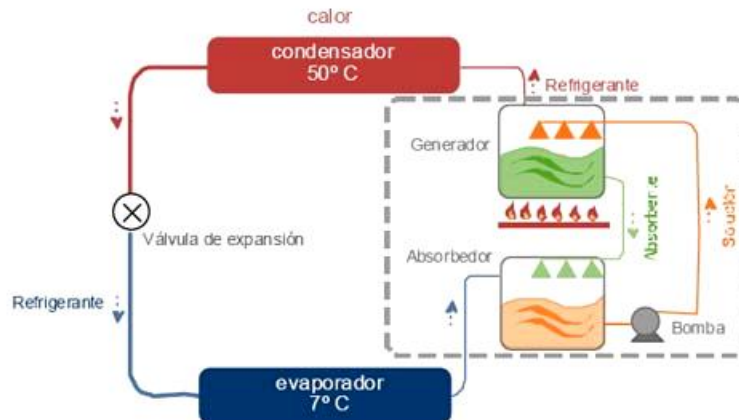


Figura 1-5. Equipos de una máquina de absorción de simple efecto con bombeo

El ciclo de absorción también puede ayudarse de una bomba para elevar la presión de la mezcla binaria, y una vez a alta presión, el aporte de calor producirá la separación del absorbente y el refrigerante. La energía necesaria para elevar la presión mediante la bomba es mucho menor que la que requiere un compresor, en el ciclo de compresión de vapor. A pesar de esta posibilidad, en este documento nos centraremos únicamente en ciclos de absorción que no requieran de ningún aporte de energía eléctrica, dado que el propósito es valerse de esta tecnología en zonas carentes de ésta.

## RENDIMIENTO DE LOS EQUIPOS

El coeficiente COP es la manera de indicar la eficiencia que un sistema de producción de frío alcanza. Cuanto mayor sea el coeficiente, menor es la cantidad de energía necesaria para producir la misma cantidad de frío, y variará en función de las condiciones en las que esté operando el equipo.

La ecuación de la que se obtiene el coeficiente de operación de un sistema de refrigeración por absorción es la siguiente:

$$\text{COP} = \frac{\text{Frío obtenido}}{\text{Combustible utilizado}} \quad 1-7$$

Como se puede observar, el COP carece de unidades, debido a esto el numerador y el denominador de la ecuación deben tener las mismas unidades obligatoriamente. Una unidad habitual es la potencia, medida en kW. El denominador toma su valor basándose en el poder calorífico superior del combustible empleado para el proceso.

En la Tabla 1-13 se muestran valores de COP de diferentes tipos de máquinas de absorción operando con gas natural:

Tabla 1-13. COP de una máquina de frío por absorción a gas natural

Tipo de máquina de absorción	COP a plena carga
Simple efecto	0'6
Doble efecto	1'0
Triple efecto	1'6

Las administraciones públicas, en los análisis que realizan, consideran el rendimiento de los ciclos de los equipos, partiendo desde la extracción del carburante o combustible hasta que se utiliza finalmente para servir al usuario. Esto quiere decir que se tiene en consideración la eficiencia global del ciclo energético (EFCE).

Por ejemplo, una central térmica convencional que se valga de combustible líquido para generar electricidad tiene un rendimiento del 43%. Si a este proceso le suponemos unas pérdidas debidas al transporte y la distribución del 10'2% [5], la eficiencia global EFCE de la central será del 39%.

En cuanto al gas natural se refiere, las pérdidas por extracción y transporte se consideran del 5%, por lo que su EFCE es del 95%. Como se muestra en la Tabla 1-14, los coeficientes corregidos, tanto de máquinas de absorción como de motores eléctricos quedarían de la siguiente manera:

Tabla 1-14. COP y COP corregido de máquinas de absorción y motores eléctricos

Tipo de refrigeración	COP	EFCE	COP corregido
Motor eléctrico	2 – 4	0'39	0'78 – 1'56
Máquina de absorción	0'6 – 1'6	0'95	0'57 – 1'52

A esto debe sumársele que en caso de trabajar a carga parcial (entre 40% y 70%), el rendimiento aumenta dado que se minimiza el consumo específico del motor a gas. Además, el evitar los procesos de desescarche implica que aumente el Rendimiento de Exportación Anual (REA), incluso a sobrepasar los valores de COP.

#### 1.4.1.1. CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE ABSORCIÓN

La clasificación de los sistemas de absorción puede realizarse en función de varios criterios, como son: las prestaciones, el tipo de ciclo o las sustancias que toman parte en el proceso.

##### SEGÚN PRESTACIONES

- Unidades enfriadoras
- Unidades mixtas enfriadoras-calefactoras

##### SEGÚN EL CICLO DE ABSORCIÓN

- De simple efecto:  
Con una única etapa de generación, o de separación del refrigerante y el absorbente.

- De doble efecto:  
Debe añadirse un condensador y un intercambiador más al ciclo. Con dos etapas, la eficiencia del ciclo es superior al del ciclo de simple efecto. En la etapa de alta temperatura, la primera de las dos, la solución recibe el calor directamente del quemador y en la etapa de baja temperatura se recibe el calor a través de un intercambiador, del vapor del refrigerante antes de que haya pasado al condensador.

- De triple efecto:

Funciona de forma similar al de doble etapa, introduciendo un nuevo condensador y otro intercambiador más.

En la Tabla 1-15 se resumen los tipos de sistemas de absorción de una y dos etapas.

Tabla 1-15. Tipos de sistemas de absorción según el ciclo de absorción [6]

Sistema	Niveles de presión	Temperatura de operación [°C]		Fluido de trabajo	COP	Observaciones
		Fuente caliente	Fuente fría			
Simple efecto	2	80 - 110	5 - 10	LiBr-H <sub>2</sub> O	0'5 - 0'7	Sistema más simple y ampliamente utilizado
						Se requiere absorbedor enfriado por agua para prevenir la cristalización
	2	120 - 150	< 0	H <sub>2</sub> O-NH <sub>3</sub>	0'5	No hay problemas de cristalización
						Requiere rectificador
						Se aconseja su uso en bombas de calor debido a su amplio rango de operación
Doble efecto	3	120 - 150	5 - 10	LiBr-H <sub>2</sub> O	0'8 - 1'2	El calor liberado en el condensador del primer nivel se utiliza como energía para el generador del segundo nivel
						Ciclo de alto comportamiento disponible comercialmente
	2	200	< 0	H <sub>2</sub> O-NH <sub>3</sub>	0'9	El calor liberado en el primer absorbedor se utiliza como energía que entra en la segunda etapa de generador
						Unidades experimentales

## SEGÚN LA SUSTANCIA QUE COMPONGA LA SOLUCIÓN

Como se ha mencionado con anterioridad, los equipos de absorción se valen de la facilidad que algunas sustancias tienen para mezclarse y separarse. En la práctica, se utilizan dos pares de mezclas habitualmente.

- Bromuro de litio-Agua:

Estos ciclos usan el LiBr como absorbente y el H<sub>2</sub>O como refrigerante. En estos equipos se emplea el agua para producir el enfriamiento en el absorbedor y en el condensador.

- Agua-Amoníaco:

En este caso el H<sub>2</sub>O actúa como absorbente y es el amoníaco el refrigerante. Se utilizan estos equipos para equipos de hasta 20 kW de potencia, tanto para refrigerar alimentos como para climatizar estancias. Estos ciclos evaporan tanto el refrigerante como el



absorbente, pero el agua condensa con mayor celeridad. El enfriamiento del absorbedor y del condensador se produce generalmente por aire.

- Otras:

En otros casos se utilizan mezclas tales como metilamina y agua, R-22 y dimetiléter de tetraetileno o metanol y bromuro de litio; siendo la metilamina, el R-22 y el metanol los refrigerantes y el agua, el dimetiléter de tetraetileno y el bromuro de litio los absorbentes.

#### 1.4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE ABSORCIÓN SIMPLE

Si nos referimos a un ciclo de absorción de simple efecto básico, se observa a simple vista que se ha sustituido el compresor del ciclo de compresión de vapor por un sistema de absorción conformado por un absorbedor y un generador, y en ocasiones una bomba. Este sistema realiza la misma función que el compresor en el ciclo de compresión, elevar la presión del fluido refrigerante del nivel bajo al alto. Tanto el condensador como el generador trabajan a alta presión mientras el evaporador y el absorbedor lo hacen a baja presión.

En el caso de valerse también de una bomba, esta se encarga de elevar la presión del par absorbente-refrigerante y una vez a alta presión, se emplea el aporte calorífico del generador para realizar la separación de los productos. Si la máquina carece de bomba, la elevación de la presión vendrá provocada por el aporte de calor del generador. Debido a este calor se evaporarán los productos, que al tener distinto punto de ebullición se separarán. Esquemas de los dos sistemas se muestran en la Figura 1-3 y Figura 1-5 respectivamente.

Una vez separados los componentes, el fluido refrigerante puro realiza una trayectoria y el absorbente, o mezcla pobre, traza otra. El primero, se gasifica en el evaporador tomando calor del medio que se desea climatizar y produciéndose así el efecto frigorífico. Después de su paso por el evaporador, el fluido refrigerante se pone en contacto con el líquido del absorbente, que lo arrastra hasta el absorbedor, donde se produce la absorción. Este proceso es exotérmico, por lo que requiere de una refrigeración externa para lograr que la solución mezclada se mantenga en las condiciones apropiadas de presión y temperatura. Esta refrigeración puede realizarse tanto con agua como con aire, como se ha mencionado anteriormente.

La mezcla que surge del absorbedor también se conoce como solución rica, ya que el fluido absorbente está saturado de refrigerante. Dicha solución es dirigida hacia el generador, ya sea a través de la bomba que eleva su presión, o directamente al generador. La presión hasta la que se eleva la solución viene marcada por el condensador, que será a la que el condensador se saturará a la temperatura de funcionamiento. A la salida del generador, se haya utilizado bomba o no, la mezcla de refrigerante y absorbente se habrá separado. Como se ha dicho, la solución pobre, regresa al absorbedor tras expandirse, mientras el vapor del refrigerante a alta presión circula a través del condensador. En éste, el vapor cede parte de su calor y provoca que cambie de fase y condense. A la salida, el refrigerante vuelve a ser líquido, pero se encuentra a alta presión. Para reducirla se hace circular al refrigerante por una válvula de expansión antes de llegar al evaporador para cerrar el ciclo [3].



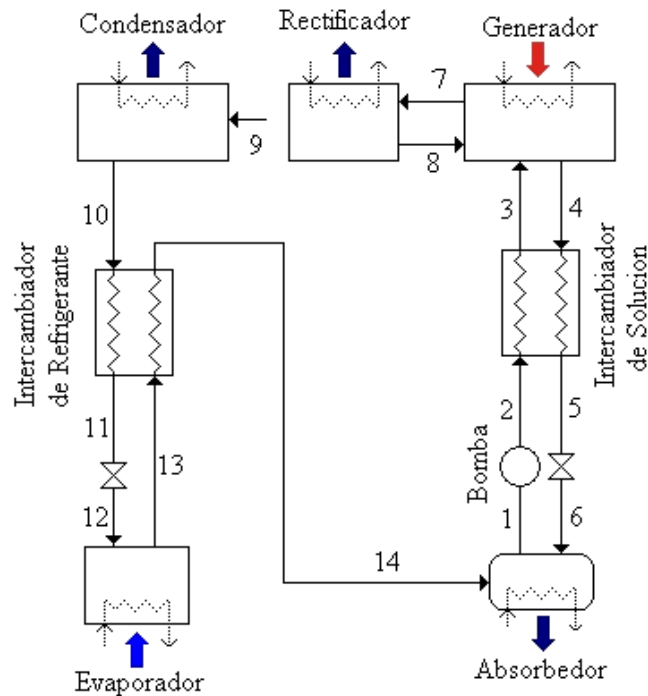


Figura 1-6. Esquema de una máquina de refrigeración por absorción con intercambiadores de calor

Este ciclo puede mejorarse, si se incorpora un intercambiador de calor entre la solución pobre que sale del generador de camino al absorbedor y la mezcla rica que sale de él en dirección contraria. La mezcla pobre está a mayor temperatura y será quien ceda el calor a la solución rica, que se precalienta antes de entrar al generador, lo que produce una reducción en la cantidad de combustible necesaria para realizar el ciclo. Al disminuir la empleada, manteniendo los niveles de presión y temperatura del ciclo, se mejora el COP del sistema. Además, al ceder calor a la mezcla rica, la solución pobre se enfría, necesitando una menor evacuación de calor al ambiente antes de volver al absorbedor.

Otra posibilidad para mejorar el rendimiento del ciclo es colocar el intercambiador de calor entre el condensador y el evaporador. La transferencia que se produce permite que el refrigerante líquido sufra un subenfriamiento tras salir del condensador, al igual que recalienta el vapor del refrigerante que sale del evaporador. Con este enfriamiento, se asegura que la entrada de refrigerante sea únicamente de líquido saturado, por lo que la absorción de calor que éste acepte será mayor. Además, al elevar la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, ésta se asemejará más a la temperatura de la mezcla pobre a la entrada del absorbedor por lo que se facilita el proceso de absorción.

#### 1.4.1.3. MEJORAS DE LOS CICLOS DE ABSORCIÓN

Como en cualquier otra tecnología, en el caso de la absorción también se trabaja en la búsqueda de mejores rendimientos, así como en la reducción del tamaño y el peso de los equipos necesarios para su funcionamiento. A continuación se tratan algunas de las líneas en las que se trabaja actualmente para la mejora de lo rendimiento.

## CICLO DE ABSORCIÓN DE DOBLE EFECTO

Para crear la configuración de doble efecto, se deben incorporar al ciclo de simple efecto ciertos equipos, para así mejorar el rendimiento. Los de doble efecto son posibles en las máquinas que emplean el par  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , porque trabajan con niveles de presión muy bajos, al contrario que en el caso del par  $\text{H}_2\text{O-NH}_3$ . Introducir una segunda etapa en los ciclos de amoníaco elevaría la temperatura hasta un nivel en el que el incremento de la presión sería excesivo, y por ende peligroso.

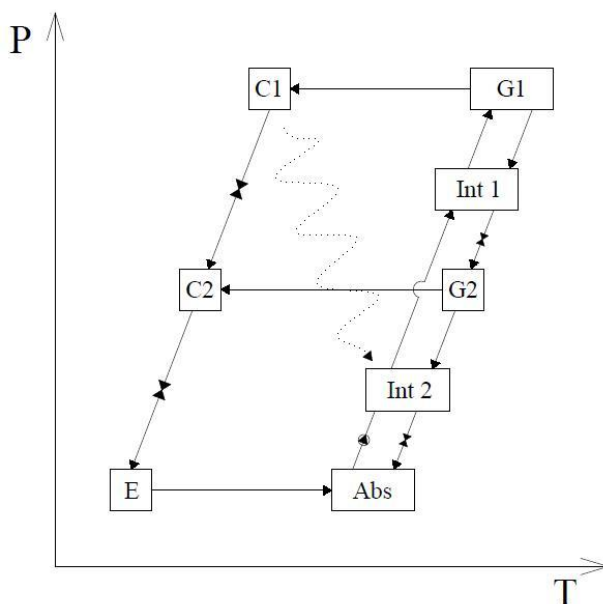


Figura 1-7. Equipos de una máquina de absorción de doble efecto en configuración en serie sobre un diagrama p-T

Los ciclos simples de  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$  suelen trabajar en el rango de temperaturas comprendido entre 70 y 90 °C, mientras que los de doble efecto pueden alcanzar temperaturas de entre 140 y 180 °C. El notorio incremento de temperatura incurre en un aumento del COP, que pasa de ser 0'65 – 0'75 a valores que casi doblan a estos, 1'2 – 1'35. Este aumento es debido a la incorporación de un generador, un condensador y un intercambiador de calor solución-solución. Pero debe contarse con que estos valores son teóricos, ya que la presencia de irreversibilidades debidas a las transferencias térmicas entre el desorbedor y el condensador secundarios, así como en los intercambiadores de temperatura, hacen que estos valores no sean los que se han obtenido hasta el momento en las máquinas comercializadas (0'8 – 1). A esto se le debe añadir el aumento en el monto de la máquina, porque se requiere de más equipos para trabajar [7].

El funcionamiento de los ciclos simple y doble es similar, se distinguen en que, en los ciclos dobles hay una mayor cantidad de corrientes. Para explicar el funcionamiento de un ciclo de absorción de doble efecto podemos valernos de su representación en el diagrama de Duhring de la Figura 1-8, que no será exacto al de los fabricantes pero coincidirá en la estructura básica.

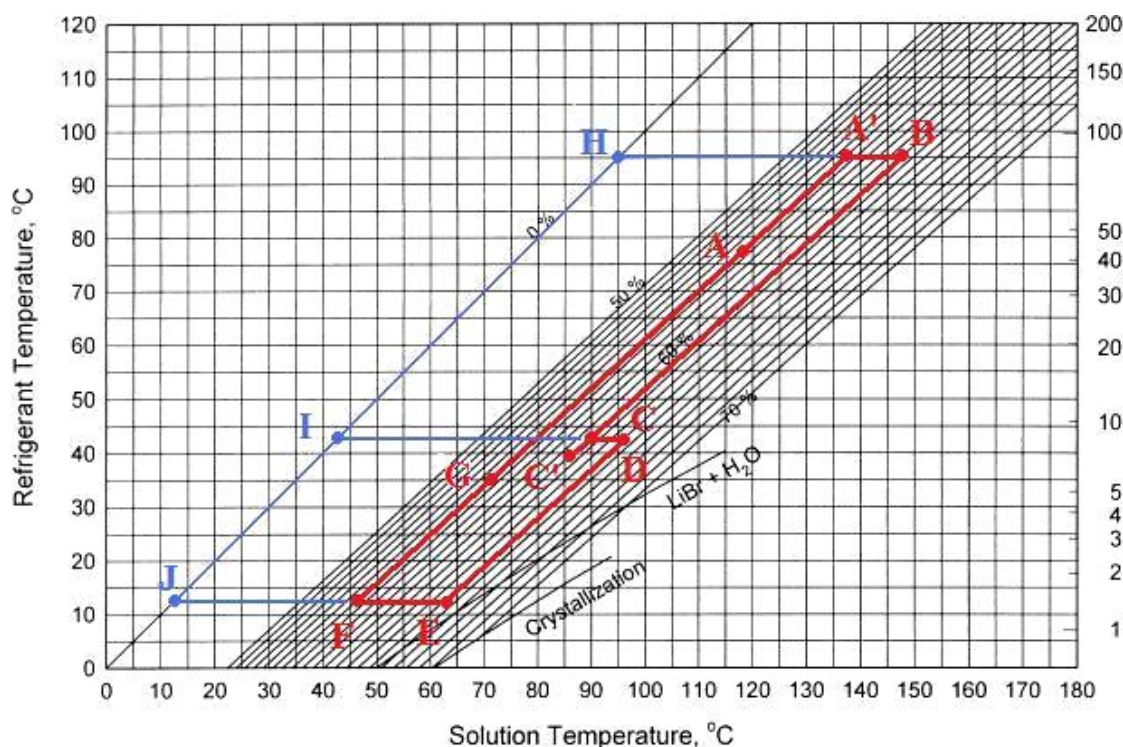


Figura 1-8. Esquema de flujos de una máquina de absorción de doble efecto LiBr-H<sub>2</sub>O

Supongamos el inicio del ciclo en el generador de alta temperatura. La mezcla de soluciones absorbente-refrigerante llega con las condiciones de salida del absorbedor, punto A. En este primer generador la temperatura de la solución se eleva hasta alcanzar las condiciones del punto A', por lo que se producirá la evaporación de parte de la solución que saldrá por el conducto A'-H, mientras que el resto de la solución se concentrará en sustancia absorbente hasta la concentración intermedia que saldrá por la línea A'-B. El conducto A'-H une el generador de alta temperatura con el de baja, que es a donde se dirige el vapor de refrigerante obtenido en la primera separación.

La solución intermedia traspasa el intercambiador de alta temperatura Int1 para dirigirse al generador de baja temperatura. El paso por él, reduce la temperatura de la solución haciendo que sus condiciones cambien del estado B al C'.

Cuando el vapor obtenido en el generador de alta temperatura, alcanza el generador de baja, cede parte de su energía en forma de calor a la solución intermedia que también ha llegado al generador. Como la solución intermedia ha reducido su temperatura en el intercambiador hasta condensarse, el aporte de temperatura que le otorga el vapor del generador G1 logrará que una mayor cantidad de refrigerante se evapore. Así se obtiene una mayor cantidad de vapor de refrigerante que se envía al condensador y la solución absorbente-refrigerante se concentra en absorbente. El proceso que sucede en el generador de baja temperatura viene representado en el diagrama como C'-C-D.

En el generador de baja temperatura vuelve a haber tres corrientes de entrada y dos de salida. La solución, más concentrada en absorbente a la salida, pasa por el intercambiador de baja temperatura (Int2) para cambiar sus características del estado D al E. La pérdida de temperatura que sufre la solución es aportada a la solución diluida, al igual que en el intercambiador Int1.

Las otras salidas del generador de baja temperatura contienen por un lado vapor del refrigerante en la línea C-I y por otro, refrigerante en forma líquida por la línea H-I, que ha condensado en él, al ceder calor a la solución concentrada. Estas dos salidas se unen en el condensador, donde el vapor producido en el generador de baja temperatura ha condensado. El cambio de fase que sufre el vapor requiere de una extracción de calor del mismo, lo cual puede lograrse con refrigeración por aire o mediante una corriente de agua refrigerante que después deberá ser enviada a una torre de refrigeración.

Una vez unidas las dos corrientes de refrigerante se envían al evaporador, donde se mezcla con una mayor cantidad de refrigerante acumulado en el mismo, y alcanza las condiciones del punto J. En el evaporador el refrigerante se dispersa a lo largo de los tubos de transferencia térmica para absorber el calor del recinto a refrigerar y evaporarse nuevamente. Esto se traduce en la imagen por la línea J-F. Después de traspasar el evaporador, el refrigerante se dirige al absorbedor, representado como “Abs” en la Figura 1-7.

En el absorbedor, el refrigerante es absorbido por la solución concentrada en absorbente para transformarse en la mezcla diluida representado por la línea E-F. Como el proceso de absorción es exotérmico se requiere de la evacuación del calor generado, para lo que se puede utilizar, al igual que en el condensador, aire o una corriente de agua de refrigeración.

Después del absorbedor, la solución, ahora diluida, atraviesa los intercambiadores de calor, primero el de baja temperatura (línea F-G) y después el de alta (línea G-A). Tras elevar la temperatura de la mezcla absorbente-refrigerante, ésta se introduce en el generador de alta temperatura para cerrar definitivamente el ciclo.

Los sistemas de refrigeración por absorción de doble efecto pueden instalarse en tres configuraciones diferentes, que son las siguientes: serie, paralelo e invertida. Estas configuraciones son las mostradas en la Figura 1-9 de forma esquemática, y posteriormente se definen brevemente las características de las mismas.

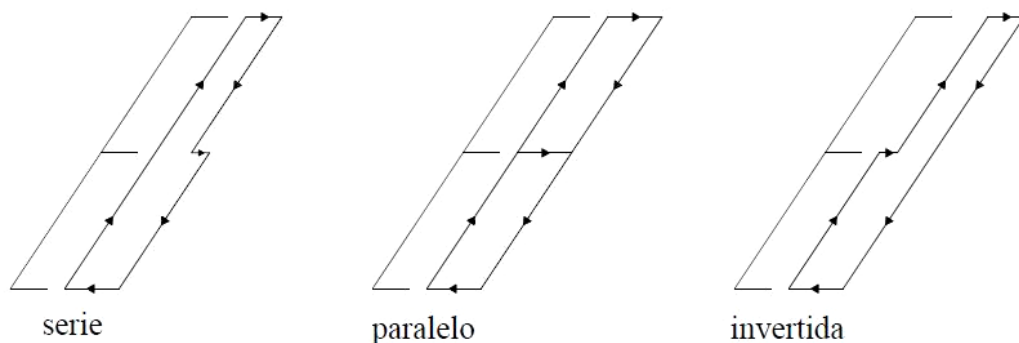


Figura 1-9. Variantes del ciclo de doble efecto indicando el recorrido del absorbente

- Configuración en serie:

La solución concentrada procedente del absorbedor se dirige al generador de alta temperatura, a continuación entra en el de baja temperatura.

- Configuración en paralelo:

El flujo saliente del absorbedor se divide en dos para alimentar de forma independiente ambos generadores.

Al contrario que en la configuración en serie, la solución concentrada entra primero en el generador de baja temperatura y después en el de alta.

The graph illustrates the evolution of a system over time (T) and pressure (P). The nodes represent different states or components, and the edges represent transitions between them. The graph is structured as follows:

- Nodes:** E, C1, C2, G1, G2, Int. 1, Int. 2, and Abs.
- Edges:**
  - E to C2 (marked with a double arrow)
  - C2 to C1 (marked with a double arrow)
  - E to Abs
  - Abs to Int. 1
  - Int. 1 to G2
  - G2 to Int. 2
  - Int. 2 to G1
  - G1 to C1
- Shaded Region:** A shaded parallelogram highlights a sub-graph involving G1, G2, Int. 1, and Int. 2, indicating a specific region of interest in the phase space.

En la configuración en paralelo se observan notorias diferencias con el ciclo en serie. Como se muestra en la Figura 1-10, y hemos comentado antes, los dos generadores se alimentan independientemente por dos canales distintos que salen del absorbedor. El control del sistema es más sencillo que en el caso de las configuraciones en serie o invertida, pero el rendimiento decrece por la falta de conexión entre los generadores.

**upna**  
Universidad  
Pública de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

Todos los derechos reservados  
Eskubide guztiak erresalbatu dira

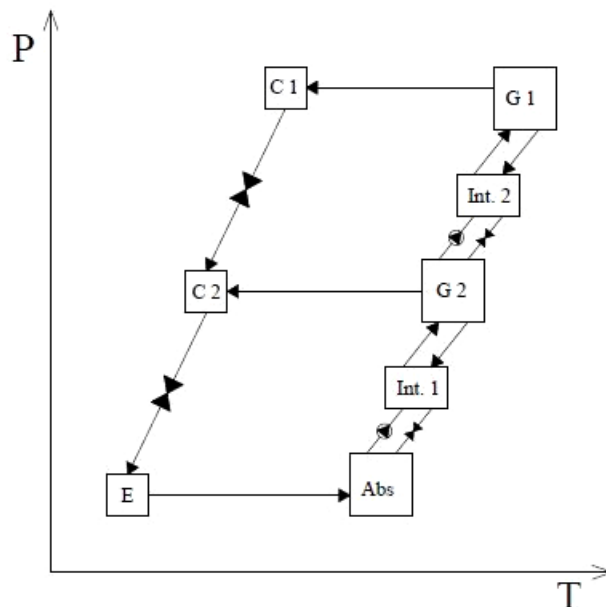


Figura 1-11. Equipos de una máquina de absorción de doble efecto en configuración invertida sobre un diagrama p-T

En resumen, las configuraciones en paralelo e invertida tienen un control del sistema más sencillo que la configuración en serie, pero las mejoras obtenidas en las técnicas de control y la necesidad de incorporar una bomba más hace que los fabricantes se decanten en mayor medida por la configuración en serie.

## CICLO GAX

El ciclo GAX (Generator-Absorber-heat eXchanger) es una simplificación de los ciclos de doble efecto, dado que reduce el número de componentes necesarios sin alterar el comportamiento de la máquina. Al igual que los ciclos simples, los ciclos GAX operan con dos niveles de presión. Si la temperatura del generador es suficientemente alta, se produce un solapamiento de temperaturas entre el generador y el absorbedor. Dicho solapamiento es utilizado en el ciclo GAX para transferir energía térmica desde el absorbedor hacia el generador. Este traspaso reduce la demanda de energía térmica externa que se obtiene del combustible por lo que aumenta el rendimiento del ciclo.

Esta cesión de energía puede verse como un intercambiador de energía a contracorriente entre el absorbedor y el generador. Como se ha explicado anteriormente, en el absorbedor se introducen el vapor de refrigerante proveniente del evaporador y la mezcla pobre desde el generador, tras lo cual se inicia el proceso de absorción. El proceso exotérmico debe ser refrigerado para que pueda proseguir la absorción, y este calor puede aprovecharse. La sección del absorbedor que está a mayor temperatura se pone en contacto con el generador, mientras que la parte a menor temperatura se refrigera exteriormente.

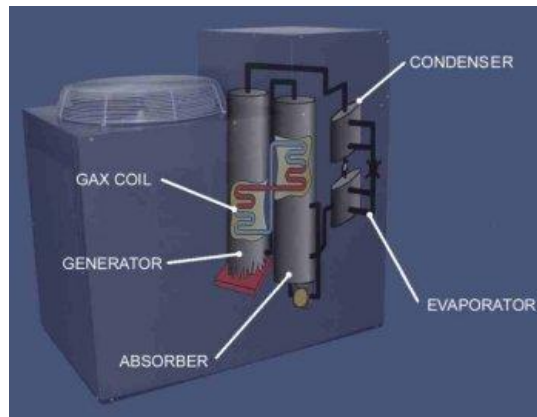


Figura 1-12. Esquema del absorbedor-generator-intercambiador de ciclo GAX

En el generador, la solución rica en refrigerante procedente del absorbedor es calentada por el propio componente, iniciándose el proceso de aumento de presión y temperatura, y la desorción. Una vez se alcanza la temperatura máxima que puede aportar, es necesaria una fuente externa de calor para obtener la totalidad deseada de vapor refrigerante.

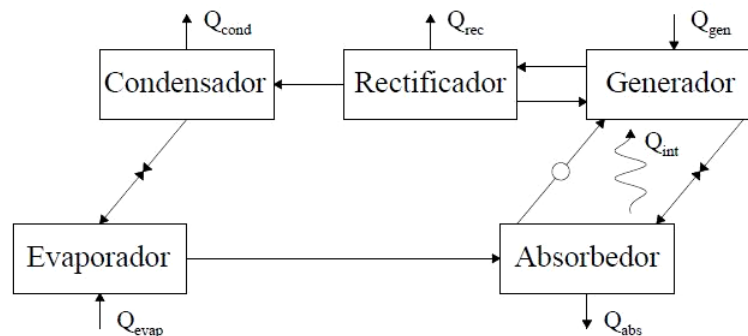


Figura 1-13. Representación de un ciclo GAX

En la Figura 1-13 se muestra el flujo de calor que procede del absorbedor y se dirige al generador para así comenzar el proceso de desorción. Al igual que pasa en los ciclos de doble efecto, parte del vapor de refrigerante obtenido se logra de forma gratuita, dado que no se requiere de combustible para producir la evaporación. De nuevo, de forma análoga a los ciclos de doble efecto, el COP teórico es superior a la unidad. Pero como pasa en los ciclos de doble efecto, las mismas irreversibilidades provocan la reducción del coeficiente a las proximidades de la unidad. De lo tratado se extrae que un ciclo simple, empleando el concepto de GAX puede alcanzar coeficientes de operación tan altos como los de un ciclo de doble efecto [7].

### CICLO DE ABSORCIÓN DE TRIPLE EFECTO

Se trata, como se observa en el nombre, de añadir más componentes a la máquina para producir un tercer efecto en el ciclo. Los equipos que deben añadirse son un nuevo generador y otro condensador, que trabajen a una temperatura mayor que la del generador de alta temperatura del ciclo de doble efecto. La temperatura a la que trabaja un generador de alta en un ciclo de doble efecto se encuentra entre 140 y 180 °C, por lo que se requiere de una fuente externa de energía térmica que alcance temperaturas muy elevadas.



El mayor rendimiento se obtiene colocando los tres generadores en serie, pero en caso de colocar el tercero en paralelo se mejora la operación del equipo a costa de reducir el rendimiento. Hay una gran variedad de posibles configuraciones para los ciclos de triple efecto, pero al encontrarse actualmente en fase de investigación y sin equipos comerciales, no se conoce con certeza cuál es la configuración más aconsejable.

## EQUIPOS ROTATIVOS

El funcionamiento está basado en la rotación, la cual provoca un aumento de los coeficientes de transferencia, tanto de masa como de calor. El aumento se debe a que la rotación genera fuerzas gravitatorias superiores a la convencional.

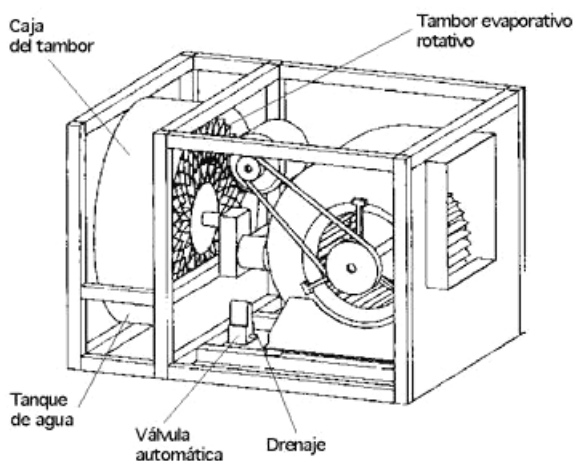


Figura 1-14. Equipo evaporador rotativo

Esta línea de trabajo ya ha superado la fase de investigación y desarrollo, llegando a producirse equipos comerciales. ICI, una productora inglesa de productos químicos, constató el concepto del aumento gravitatorio, en la década de los 70 y una empresa configurada por varias compañías, desarrolló en los años 90 equipos a partir de este fenómeno.

### 1.4.2. EQUIPOS CARACTERÍSTICOS

Los equipos que componen un sistema de refrigeración por absorción son el absorbedor, el generador, el condensador, la válvula de expansión y el evaporador. Los más característicos del sistema son el absorbedor y el generador, dado que son los que no aparecen en un sistema de refrigeración convencional de compresión de vapor. A estos componentes también puede añadirse intercambiadores de calor y rectificadores, así como sistemas de regulación y seguridad. El equipo contiene generalmente un recipiente de acero, dentro del cual se ubican el condensador, el evaporador y el absorbedor.

#### 1.4.2.1. ABSORBEDOR

Este elemento es el más importante del sistema, llegando a darle nombre al mismo. En el interior se produce una reacción fisicoquímica exotérmica entre el refrigerante y el absorbente, a la que hay que extraerle el calor excedente de modo que la reacción se produzca correctamente.



Existen varios tipos, que se diferencian en función de las trayectorias continuas o discontinuas de los flujos de líquido y vapor. Así, se distinguen tres: de flujos líquido y vapor continuos, conocidos como de película descendente; de flujo líquido discontinuo y vapor continuo; y de flujo líquido continuo y vapor discontinuo, llamado también de burbuja.

- Absorbedores con flujos líquido y vapor continuos (película descendente):

En ellos, la fase líquida forma una película descendente que se pone en contacto con el vapor. La configuración de tubos más usual para el par LiBr-H<sub>2</sub>O es en horizontal. El enfriamiento de la solución es provocada por agua de refrigeración que circula por el interior de los tubos. Por otro lado, están los tubos verticales, que son más versátiles, dado que pueden usar tanto agua como aire para producir la refrigeración.

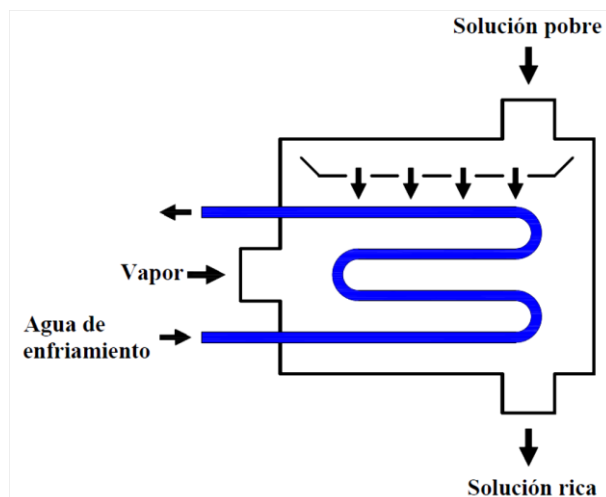


Figura 1-15. Absorbedor con flujos líquido y vapor continuos

Logran coeficientes de transferencia térmica elevados y pequeñas pérdidas de carga, pero su buen funcionamiento se ve influenciado por una correcta distribución de la solución.

- Absorbedores con flujo líquido continuo y vapor discontinuo (de burbuja):

Estos se encuentran inundados, es decir, que el interior del canal central se encuentra lleno de mezcla pobre y el refrigerante es introducido en forma de burbujas a través de unos inyectores. La refrigeración del equipo se realiza mediante agua que circula por el exterior del dispositivo.

Con el objetivo de aumentar la capacidad de absorción, suelen instalarse en la parte inferior varios canales de distribución de vapor de refrigerante y solución pobre, mientras que se recoge la solución rica en la parte superior mediante un colector.

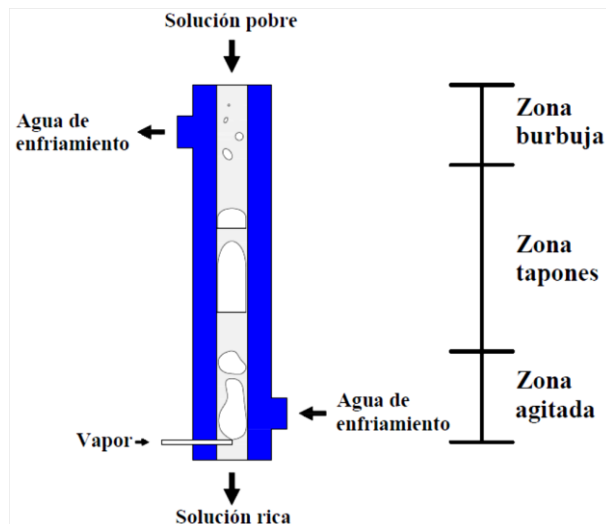


Figura 1-16. Absorbedor con flujo líquido continuo y vapor discontinuo

El suministro de flujos puede presentar distintos tipos de regímenes en el interior del absorbedor: agitado, de burbuja y tapones:

- **Agitado:**  
Las entradas de solución y vapor adquieren una forma indefinida que caracteriza el régimen.
- **De burbuja:**  
El vapor se distribuye en pequeñas burbujas separadas entre sí y totalmente rodeadas de solución.
- **Tapón:**  
La fase gaseosa se eleva a lo largo del líquido con forma de grandes balas, separadas por la solución. El tamaño de éstas es muy superior al del diámetro del tubo y es el régimen predominante en el absorbedor.

- **Absorbedores con flujo líquido discontinuo y vapor continuo:**

Este tipo, separa las acciones de absorción del vapor y disipación del exceso de temperatura. Inicialmente se ponen en contacto las fases líquida y gaseosa. Tras finalizar la absorción, la corriente con concentración rica en refrigerante se introduce en un intercambiador de calor para disipar el procedente de la reacción. Finalmente, la solución se divide en dos flujos, uno que se dirige al generador y otro que es recirculado al absorbedor.

Dado que la absorción se produce de forma adiabática, la temperatura de la solución se eleva provocando que el proceso se detenga cuando la suma de presiones de saturación y capilar alcanza el nivel de la presión de la cámara. La presión de la capilaridad que provoca la tensión superficial de las gotas es inversamente proporcional al diámetro de las propias gotas. Para que suceda la absorción, es necesario superar la presión capilar de la gota. Si se ha de dar esta situación, la presión del absorbedor debe ser superior a la suma de las presiones de saturación de la solución y la capilar de la gota. De esto se extrae que existe un diámetro óptimo de tubo para el que la absorción es máxima.

#### 1.4.2.2. GENERADOR

Si el sistema funciona con una bomba de caudal, la presión de la solución rica procedente del absorbedor será elevada hasta la de la operación del generador, en caso contrario, el generador funciona a la misma presión que la solución sale del absorbedor. También puede emplearse un intercambiador de calor para que la temperatura de la solución a la entrada al generador sea mayor y así reducir la cantidad de combustible necesario para el ciclo. En el proceso, si no se ha bombeado la solución, comienza elevándose la temperatura y presión por el aporte calorífico y posteriormente se produce la desorción en la que los dos componentes de la mezcla son separados por la diferencia de temperaturas de ebullición. En ese punto, se producen dos salidas del dispositivo, una con el vapor del refrigerante que se dirige al condensador y la otra con una solución pobre que es recirculada al absorbedor, habiendo pasado por el intercambiador de calor para reducir su temperatura y presión.

Como se ha indicado, en el generador se produce la desorción, para lo que es necesario un aporte de calor mediante una fuente externa de temperatura elevada. Por el uso de ésta se dice que el proceso de desorción es un proceso endotérmico. El mencionado aporte de temperatura puede provenir de un gran número de fuentes como lo son el gas natural, el GLP o el biogás a través de su combustión directa con un quemador, un fluido caloportador calentado por energía solar o el calor residual de otro proceso independiente a la producción de frío.

Realizando un análisis del proceso de desorción, se considera que el vapor de refrigerante que se obtiene a la salida del generador está en estado de vapor saturado. El refrigerante obtenido no tiene una concentración del 100% porque arrastra pequeñas cantidades de absorbente consigo. Este absorbente debe retirarse del flujo antes de entrar al condensador, por lo que es necesaria la incorporación de un rectificador [7].

#### 1.4.2.3. CONDENSADOR

El condensador es uno de los dispositivos más relacionado con la eficiencia de un sistema de refrigeración, tanto si es de compresión de vapor como si se trata de un sistema de absorción. A pesar de su importancia en el funcionamiento, es un elemento muy sencillo en cuanto a su estructura y el proceso que se realiza en el mismo.

A él llega el vapor del refrigerador que proviene del generador, o del rectificador si lo hubiese. Una vez en el condensador, éste es condensado y convertido en líquido. Para que se produzca este cambio de fase en el refrigerante es necesario extraer el calor del mismo, que es desechado y transferido al ambiente a través de la superficie exterior del condensador.

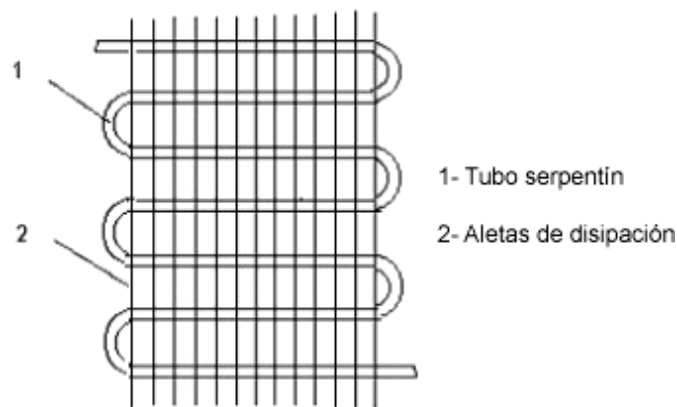


Figura 1-17. Condensador de tubo y aletas

#### 1.4.2.4. VÁLVULA DE EXPANSIÓN

Para realizar el proceso de producción de frío, el ciclo maneja dos niveles de presión para ciclos simples y tres para ciclos dobles. Debido a estas presiones es por lo que el dispositivo de expansión cobra su importancia, dado que es éste quien permite pasar de la zona de alta presión a la zona de baja, produciéndose el efecto de Joule-Kelvin.



Figura 1-18. Válvula de expansión termostática de acero inoxidable

El efecto Joule-Kelvin provoca que el refrigerante que originalmente se encuentra como líquido saturado con altas temperatura y presión, cambie evaporándose parcialmente y bajando ambas. Después del dispositivo de expansión el refrigerante atraviesa el evaporador, donde esta evaporación parcial pasa a ser total.

#### 1.4.2.5. EVAPORADOR

Como pasa con el condensador, el evaporador es un elemento de gran importancia para el ciclo de refrigeración. Al igual que con el condensador, el evaporador forma parte de cualquier sistema de refrigeración, sin importar si se trata de uno con compresión de vapor o de absorción, y lo mismo sucede con los sistemas simples, dobles, ciclos GAX y demás variantes del mismo.

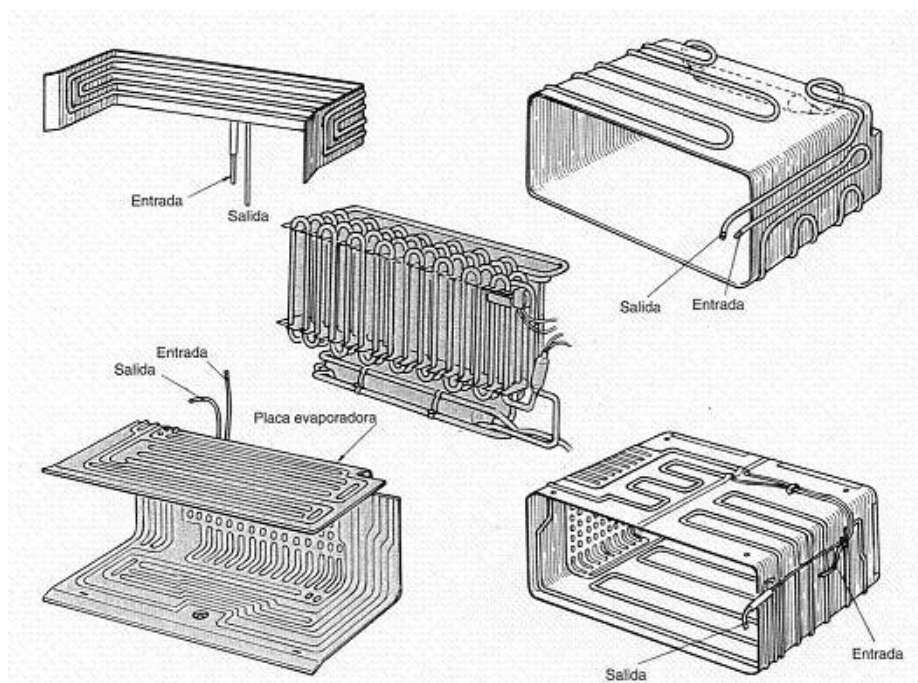


Figura 1-19. Evaporadores de placas

La presión en el interior del evaporador es mucho menor que la que alcanza el refrigerante tras salir de generador, por lo que la temperatura a la que el refrigerante realiza el cambio de fase de líquido a vapor es muy baja. La baja temperatura que precisa el fluido para evaporarse hace que pueda extraer el calor latente del medio que se desea refrigerar. Como se ha mencionado, a la salida del evaporador la evaporación del refrigerante es total.

El tipo de evaporador más utilizado en refrigeradores y congeladores domésticos es el de placas, ya que es fácil de limpiar y su fabricación no acarrea grandes costos para cualquier forma que se requiera.

#### 1.4.2.6. INTERCAMBIADOR DE CALOR

Como se ha mencionado con anterioridad, la incorporación de intercambiadores de calor incrementa la eficiencia del ciclo de absorción. Los sistemas de doble efecto suelen emplear un intercambiador más que los de simple efecto dado que tiene dos generadores.

El intercambiador más común del ciclo simple se sitúa entre el absorbedor y el generador, para calentar la mezcla concentrada a la entrada del generador y enfriar la mezcla pobre que circula desde el generador al absorbedor. Reducir la temperatura de la solución pobre facilita la posterior absorción y elevar la de la solución rica reduce la cantidad de combustible necesaria para producir la desorción de la mezcla.

También puede situarse un intercambiador entre el flujo que transcurre del condensador al evaporador y el saliente del evaporador que se dirige al absorbedor. Al elevar la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador la aproxima más a la temperatura de la solución pobre con la que se mezclará en el absorbedor, facilitando el proceso. A su vez, enfriar el refrigerante antes de entrar al evaporador asegura que el líquido esté subenfriado, por lo que podrá absorber una mayor cantidad de calor de la zona a climatizar.

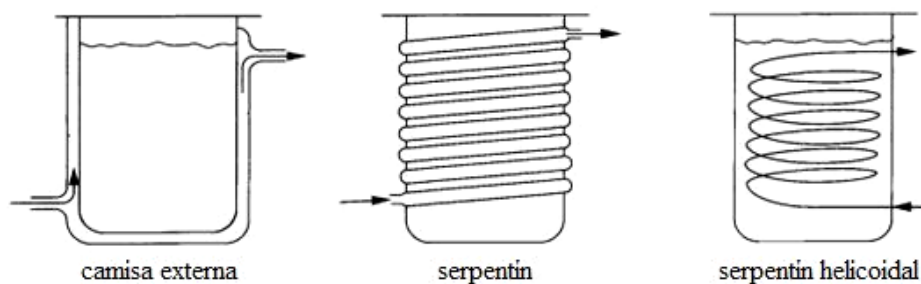


Figura 1-20. Intercambiadores de calor

#### 1.4.2.7. RECTIFICADOR

Ya se ha comentado con anterioridad, en los sistemas que emplean la mezcla  $\text{H}_2\text{O}-\text{NH}_3$  tienen el problema de la volatilidad del absorbente, por lo que es necesario deshacerse del agua antes de que llegue al condensador. Eliminando el agua que es arrastrada por el amoníaco a la salida del generador se mejora la eficiencia del equipo.

Para lograr esta eliminación se introduce en el sistema el rectificador, que consiste en un intercambiador que, al extraer calor del fluido a la salida del generador provoca la condensación de las trazas de agua arrastradas para evitar la posibilidad de generar hielo en la válvula de expansión o en el evaporador. Dado que las temperaturas que se pueden alcanzar en el evaporador son muy bajas, el agua podría solidificar obstruyendo las tuberías, lo que reduce el rendimiento del ciclo.

Del rectificador se obtiene un flujo de vapor con una concentración muy próxima al 100% en amoníaco, y se envía al condensador. La otra salida del rectificador contiene una corriente líquida con una gran cantidad de agua que retorna al desorbedor, conocida como reflujo. El proceso conlleva una pérdida de carga si se intercambia el calor con un fluido refrigerante externo, pero si se realiza con la solución rica procedente del absorbedor se logra una mejora del comportamiento del ciclo.

### 1.4.3. PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL

La producción de frío se logra porque los fluidos refrigerantes absorben calor cuando se evaporan y vuelven a cederlo cuando condensan. La elección del refrigerante que se empleará en una máquina de refrigeración depende en gran medida de la temperatura a la que condensa y se evapora el mismo. Esto es debido a que el refrigerante debe hervir a una temperatura inferior que la del recinto que se desea refrigerar. Otra característica deseable en los fluidos refrigerantes es que tenga un calor latente muy elevado.

#### 1.4.3.1. SUSTANCIAS REFRIGERANTES

En función de las sustancias que constituyen un refrigerante se pueden clasificar en los siguientes tipos: CFC (fluorocarburos con dos átomos de cloro), HCFC (fluorocarburos con un átomo de cloro y otro de hidrógeno), HFC (fluorocarburos sin ningún cloro) y  $\text{NH}_3$  (amoníaco).

Actualmente los sistemas de refrigeración más utilizados son los de compresión de vapor, y estos sistemas utilizan mayoritariamente refrigerantes halogenados (CFC, HCFC y HFC), que son sustancias relacionadas tanto con la destrucción de la capa de ozono como



con el efecto invernadero. El cloro y las sustancias refrigerantes que lo contienen provocan la destrucción de la capa de ozono, debido a la facilidad de los átomos de cloro para romper los enlaces de la molécula de ozono y robar átomos de oxígeno.

Para ralentizar esta destrucción, se deben regular el consumo y la producción de las sustancias perjudiciales, para lo que se firmó en 1987 el acuerdo internacional denominado Protocolo de Montreal. Las investigaciones realizadas en las sustancias que se emplean para la refrigeración han permitido conocer en mayor medida las características y los efectos de las mismas, lo que ha causado la modificación del protocolo en varias ocasiones. Se han fijado fechas para finalizar la producción y el uso de sustancias perjudiciales, por ejemplo, los CFC no pueden venderse y los HCFC van reduciéndose hasta que en 2015 quede prohibido su uso.

Como se ha comentado anteriormente, las sustancias refrigerantes se seleccionan teniendo en cuenta, a parte del efecto que tengan sobre el medio ambiente, la inflamabilidad y toxicidad de la misma, así como la eficiencia energética que se logre con su uso. En la actualidad no se han logrado solucionar todos los problemas técnicos de cambio de refrigerantes, tales como la compatibilidad de materiales de los equipos, la obtención de COP similares, la selección de lubricantes aptos para el uso o el transporte del refrigerante entre otros.

Una de las opciones consideradas como alternativa a las sustancias tradicionales son los conocidos como refrigerantes naturales. Estos, al ser de origen natural no tienen grandes inconvenientes medioambientales, ya que afectan muy poco o nada a la capa de ozono y no contribuyen al calentamiento global. Algunas de estas sustancias son tóxicas o inflamables, lo que requiere de medidas de seguridad que pueden modificar el diseño de las máquinas, las operaciones del ciclo o su mantenimiento.

El refrigerante más destacado de entre las sustancias naturales es el amoníaco, que actualmente ya es una alternativa termodinámica y económica a refrigerantes CFC y R22 en equipos de bomba de calor. Los hidrocarburos que contienen propano, butano y mezclas de otros, son también refrigerantes con propiedades atractivas para su uso, dado que tienen buenas características y son compatibles con los equipos actuales. Por otro lado, son sustancias inflamables que deben ser manejadas con precaución. Otro fluido excelente para su uso como refrigerante es el agua, que se usa habitualmente en bombas de calor industriales de alta temperatura [4].

## SUSTANCIAS EMPLEADAS EN ABSORCIÓN

Al igual que en los sistemas de refrigeración convencionales, también en los de absorción el comportamiento depende de las propiedades del fluido de trabajo. Es imperativo que el par de sustancias absorbente-refrigerante tenga una miscibilidad adecuada en el rango de temperaturas de operación de la máquina cuando ambos se encuentran en estado líquido. Además de lo cual, la mezcla debe ser químicamente estable, y no puede ser ni tóxica ni explosiva. A todo esto se le suman los siguientes requerimientos, que sin ser imprescindibles son deseables:

- Una diferencia lo más amplia posible entre las temperaturas de ebullición del refrigerante puro y la mezcla.

- El calor de vaporización del refrigerante debe ser lo mayor posible, a la vez que su temperatura de congelación sea baja y con una presión de vapor media.
- Una concentración elevada de refrigerante en la mezcla, que mantenga una tasa de circulación entre el generador y el absorbedor baja por unidad de capacidad de enfriamiento.
- Las propiedades que influyen en la transferencia térmica y de masa han de ser lo más favorables posibles: conductividad térmica, coeficiente de difusión y viscosidad.
- Las dos sustancias constituyentes de la mezcla deben ser de bajo coste, no corrosivas con los materiales de los equipos y respetuosas medioambientalmente.

Las dos mezclas más empleadas en la refrigeración por absorción son el agua-amoniaco y el bromuro de litio-agua. A pesar de que ninguna de las mezclas cumple la totalidad de las solicitudes mencionadas, se aproximan satisfactoriamente. Otras muchas mezclas se han estudiado y probado, pero solo se han logrado buenos resultados en aplicaciones especiales.

Tabla 1-16. Propiedades medioambientales de las sustancias utilizadas en máquinas de absorción

Propiedad	Amoniaco R-717	Agua R-718	LiBr Sal Diluida
Estabilidad química	Media	Alta	Alta
Toxicidad	Alta	Nula	Baja
Disponibilidad	Alta	Alta	Alta
Efectos contaminantes	Bajos	Nulos	Nulos
ODP <sup>i</sup>	0	0	0
GWP <sup>ii</sup>	0	0	0
TEWI <sup>iii</sup>	Bajo	Nulo	Bajo
Calor latente vaporación	1'25 MJ/kg	2'5 MJ/kg	N/A
Coste	Medio	Bajo	Medio

En la Tabla 1-16 se resumen las propiedades medioambientales de algunas de las sustancias más empleadas en refrigeración por absorción. Dado que uno de los requerimientos consiste en tener bajos o nulos efectos sobre el medio ambiente, se observa que estas sustancias cumplen dicho requisito [4].

## SISTEMA AGUA-AMONÍACO

Las propiedades del amoníaco le confieren una transferencia de calor que supera con facilidad la de los refrigerantes fluorados más comunes. Como ejemplo, poner que el amoníaco tiene una capacidad de refrigeración seis veces superior a la del R-22 y hasta ocho veces mayor que la del R-12. Gracias a ese hecho y a que la viscosidad del amoníaco es algo menor que la de los refrigerantes mencionados, las tuberías que se emplean en las máquinas tienen costos muy inferiores. Además de abaratar las tuberías, el precio del propio amoníaco es mucho más bajo que el de la mayor parte de los refrigerantes

<sup>i</sup> ODP (Ozone Depletion Potential): Índice de la incidencia de la sustancia en el aumento de la destrucción de la capa de ozono.

<sup>ii</sup> GWP (Global Warming Potential): Índice de contribución al efecto invernadero.

<sup>iii</sup> TEWI (Total Equivalent Warming Impact): Índice que muestra la suma de los efectos directos de la emisión de la sustancia y los indirectos debidos a la generación de energía necesaria para que la unidad refrigeradora funcione.



fluorados, además de requerir cantidades menores de fluido para producir los mismos efectos de refrigeración. El amoníaco es una sustancia competitiva incluso comparándola con los refrigerantes de nueva generación como puede ser el R-134a.

Actualmente, el uso del par de refrigeración agua-amoníaco se centra principalmente en grandes plantas industriales que producen frío en torno a 1 MW de potencia y en aires acondicionados de pequeña potencia y llama directa. Estos equipos de llama directa suelen utilizar combustibles como el propano, el butano o el gas natural. Otra línea de uso del amoníaco es el sector alimenticio, que demanda una refrigeración comprendida entre 0 °C y -10 °C para producir hielo o refrigerar cámaras de almacenamiento. El sector alimenticio también dispone de calor residual de otros procesos que suele encontrarse a temperaturas inferiores a los 100 °C, que puede ser empleado en producir frío con equipos de absorción a un coste casi nulo. El mercado de la refrigeración con amoníaco también puede extenderse a los sectores residencial y comercial por su requerimiento cada vez mayor de acondicionamiento de aire y refrigeración.

El agua y el amoníaco tienen una gran solubilidad el uno en el otro para un amplio rango de condiciones de operación, además el agua tiene una gran afinidad por el vapor de amoníaco procedente del evaporador. Los fluidos son altamente estables, tanto por separado como mezclados y exceptuando el cobre y sus aleaciones, son compatibles con todos los materiales de los equipos. Un impedimento para el uso del amoníaco es su toxicidad, que limita su uso en aplicaciones de aires acondicionados.

La mayor pega para el uso del par agua-amoníaco radica en el hecho de que el agua tiene una volatilidad relativamente alta, por lo que a la salida del generador pueden contenerse cantidades considerables de vapor de agua. En caso de que estas partículas atravesasen el condensador de camino al evaporador, elevarían la temperatura de este último reduciendo el efecto refrigerante. Este problema puede solventarse incorporando un rectificador que elimina el vapor de agua procedente del generador antes de que alcance el condensador.

Otra desventaja de la mezcla es que las presiones de condensación y evaporación son superiores a la atmosférica (si la temperatura de condensación es de 40 °C y la de evaporación de 0 °C, el amoníaco alcanzará presiones próximas a 1500 y 500 kPa), por lo que la toxicidad del amoníaco limita su uso en algunos países como España.

Como se ha comentado, existe un potencial mercado en sistemas de refrigeración por absorción en el rango 10 – 150 kW y bajas temperaturas de accionamiento, a pesar de lo que actualmente no hay en el mercado equipos para cubrir esta demanda. Para desarrollar estos equipos deben llevarse a cabo ciertas mejoras que pueden resumirse en los siguientes aspectos:

- Componentes avanzados con elevadas prestaciones. Dado que la fuente de calor es de baja temperatura, la transferencia térmica debe tener una gran eficiencia.
- Mejor sistema de separación de agua y amoníaco. La rectificación que asegura la completa separación de la mezcla requiere de equipos adicionales y la disipación de parte de la energía térmica. Estos equipos y la disipación son mayores cuanto menor es la temperatura de refrigeración deseada.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal de este trabajo es optimizar un sistema de refrigeración por absorción para poder usarlo alimentado con biogás. Para ello, tomaremos un refrigerador diseñado para su uso con gas licuado de petróleo (GLP) y modificaremos el quemador para que el sistema pueda funcionar con el biogás obtenido directamente de la planta de biodigestión de la Universidad Mayor de San Simón (UMSS), en Cochabamba, Bolivia.

Se pretende saber si podría llegar a ser viable y beneficioso, tanto para los usuarios como para el medio ambiente, el uso de refrigeradores con sistemas de absorción modificados para trabajar con biogás. Las características de la geografía y despliegue de tendido eléctrico de Bolivia lo convierten en un lugar inmejorable para implantar este sistema.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Una vez puesto en marcha el refrigerador, se analizará el funcionamiento y la eficiencia del sistema al emplear biogás como combustible, para conocer el posible desarrollo de su uso. Bolivia tiene una enorme superficie con potencial uso de biodigestores y carentes de energía eléctrica, por su difícil acceso y poco uso de electricidad, al tratarse de zonas agrestes con un sector agropecuario muy desarrollado.

Así mismo, será necesario estudiar las dificultades técnicas y económicas que pudieran surgir en la implantación de un sistema de estas características. La instalación, tanto del sistema de biodigestión, como del refrigerador requieren una mano de obra con cierta cualificación y una inversión inicial, mientras que su mantenimiento es más sencillo y, por lo general, poco costosa.

Debido a que no se dispone de datos contrastados de las propiedades del gas producido en el biodigestor, se aprovechará este trabajo para estudiar algunas características del mismo a partir de los datos obtenidos en el sistema de refrigeración. Se buscará el poder calorífico del biogás, y a partir de ese dato se obtendrá la cantidad de metano que contiene. Esto nos será de utilidad para comparar el gas que emana de los plátanos usados en la UMSS con posibles alimentos de mayor calidad.

Se realizará un estudio económico de la inversión que requiere la implantación de este sistema. Sin centrarse en el montaje de un biodigestor, se considerará el costo que requiere su construcción, así como la compra de un refrigerador por absorción y las modificaciones necesarias para que pueda funcionar con el biogás obtenido del biodigestor. También se considerará el gasto de eliminación de los desechos orgánicos que no es necesario en caso de emplearlos como alimento del digestor.

Finalmente se emplearán los datos obtenidos del progreso en el encendido del refrigerador mediante biogás, se compararán con el mismo proceso para el uso de GLP para el que el refrigerador fue diseñado, y así poder indicar la posible pérdida o ganancia de potencia al realizar las modificaciones del quemador y el combustible.



### 3. OBTENCIÓN DE BIOGÁS

#### 3.1. BIODIGESTOR DE LA UNIVESIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN

El biogás con el que se realizan las pruebas en el refrigerador se obtiene de un biodigestor instalado en la Universidad Mayor de San Simón. Biodigestor que fue construido por la Facultad de Ciencia y Tecnología, para llevar a cabo ensayos y prácticas tanto con el gas como con el biol producidos. El recinto en que se instaló el biodigestor tuvo que ser vallado para evitar ataques contra el equipo.

El biodigestor tiene unas características particulares, dado que no es de tipo tubular plástico ni de domo fijo, como la mayoría de biodigestores en Bolivia. El digestor de la UMSS está semienterrado, con 1 m de profundidad, 2 m de ancho y 6 m de longitud, y cubierto con una carpa de polietileno de 1 mm de espesor.



Figura 3-1. Biodigestor después de cargar las garrafas

La carpa de polietileno que cubre el biodigestor puede alcanzar 0'75 m de altura cuando la carga es máxima, y tiene tres orificios por los que se puede extraer el biogás. La presión con la que el gas sale no es suficiente para cargar las garrafas y llevar a cabo los ensayos, por lo que se utiliza el compresor eléctrico que se observa en la Figura 3-1. Al extraer el biogás del digestor, la presión de la carpa disminuye mucho por la reducción de volumen.

El compresor eléctrico se encuentra en una construcción aislada en la que se realiza el llenado de las garrafas, y que por motivos de seguridad carece de fuentes eléctricas. Por ese motivo es necesario hacer llegar un cable desde otro edificio y realizar la conexión manualmente, como se muestra en la Figura 3-2. La conexión se realiza mediante un cable alargador que carece de base. Las puntas del alargador rodean los conectores del cable del compresor y las uniones se aíslan mediante fragmentos de bolsas de plástico que se anudan para evitar cortocircuitos.



Figura 3-2. Conexión eléctrica del compresor

En el lado opuesto de la zona de alimentación hay una piscina de biol (Figura 3-3). Los líquidos que alcanzan un nivel fluyen a través de un conducto aumentando nuevamente la capacidad del biodigestor. Este líquido puede utilizarse como abono para una mejor cosecha, que a su vez produce más residuos que alimenten al biodigestor.



Figura 3-3. Piscina de biol

### 3.2. ALIMENTACIÓN DEL BIODIGESTOR

A pesar de haber comenzado utilizando los residuos del comedor de la universidad, actualmente el biodigestor se alimenta únicamente con plátanos obtenidos de los excedentes de “La Cancha”, un mercado local de Cochabamba.

Aproximadamente 200 kg de plátano maduro se añaden cada semana al digestor, y otros 200 litros de agua. Antes de introducirlos se trituran los plátanos como muestra la Figura 3-4, para facilitar la biodegradación y acelerar el proceso de producción. La carga se



realiza a través de un orificio que se encuentra cerrado mientras se realiza el proceso de digestión. Este orificio se abre únicamente para alimentar los plátanos y el agua, como se observa en la Figura 3-5.



Figura 3-4. Triturando los plátanos

En caso de que el biogás o el biol no se extraigan, la capacidad del biodigestor no acepta esa adición de 200 kg de plátano semanal, por lo que en ocasiones se alimenta una menor carga. Dado que, durante el periodo en que se ha realizado este proyecto, el biol no se ha utilizado para ninguna otra tarea, éste ha sido el limitante de alimentación del biodigestor.



Figura 3-5. Alimentación del biodigestor

Al realizar la carga del biodigestor es necesario agitar el fondo del tanque para que la carga se mezcle lo mejor posible. El equipo de la UMSS carece de cualquier tipo sistemas de agitación automático por lo que debe realizarse manualmente. Para remover el tanque se emplea una pala metálica que se introduce por los laterales de la carpa, como se observa en la Figura 3-6.



Figura 3-6. Agitación del biodigestor

### 3.3. EXTRACCIÓN DEL BIOGÁS

Una carga continua del biodigestor proporciona una cantidad de productos constantes. En caso de que el biodigestor sea alimentado con 200 kg de plátano semanalmente, éste puede producir 10 m<sup>3</sup> de biogás y 3 m<sup>3</sup> de biol, aproximadamente. De no extraer la totalidad de los productos, la capacidad del biodigestor disminuye, por lo que en alguna ocasión se ha extraído biol de la piscina para aumentar la producción de biogás del biodigestor.



Figura 3-7. Compresión del biogás

En los días que se realizaron las pruebas solo se empleó biogás para las mismas. Con todas las pruebas se consumieron en torno a 2 m<sup>3</sup> de biogás a lo largo de 10 días. Debido a este bajo gasto de biogás la alimentación del digestor fue menor que en otras etapas del curso, en las que se utilizan tanto el biogás como el biol. Los medios de que se dispone en



la universidad no permiten hacer un control exhaustivo de cuanto biogás se extrae, por lo que solo se mide en momentos puntuales, como práctica o estudio particular.

Las garrafas en las que se introduce el biogás están unidas entre sí por tubos a través de los cuales circula el gas. En la Figura 3-7 se ve que la conexión entre las garrafas y el compresor se hace mediante juntas roscadas, dado que la salida de los tubos fue diseñada para ello. Por el contrario, la entrada de biogás al compresor se realiza desde una manguera que debe sujetarse con un alambre a modo de abrazadera. Esta unión no requiere de una excesiva fuerza porque, como se ha mencionado, el gas procedente del biodigestor no tiene una gran presión.

Las garrafas se llenan hasta que el biogás alcanza una presión de 7 bares. A la hora de realizar algunas pruebas se incrementa la presión de gas en las garrafas, para lo que es necesario otro compresor de mayor potencia. En esas pruebas la presión a la que se introduce el biogás es de 13 bares. Este llenado introduce una mayor cantidad de gas por lo que se requiere de más días para que se produzca suficiente biogás y poder hacer la siguiente carga.



## 4. INSTRUMENTACIÓN Y PUESTA A PUNTO

Debido a la particularidad del equipo con el que se trabaja, no es posible acceder a las mediciones de presión y de caudales del interior del sistema. Es por esto que se tomarán los valores de las especificaciones del refrigerador como ciertas. Así pues, solo se requieren las mediciones de temperatura.

### 4.1. PUESTA A PUNTO DEL REFRIGERADOR

En la primera prueba de encendido realizada empleando biogás se logró que el quemador mantuviese encendida una llama de aproximadamente 1 cm. A la hora de hacer el estudio del proceso, se observó que esa llama no entregaba energía suficiente para que la temperatura de los fluidos en el interior del circuito satisficieran los requerimientos, el refrigerador no se enfrió lo más mínimo.

Los datos de las temperaturas obtenidas en este ensayo se ven representados en el Gráfico 4-1 del apartado de resultados. Se observa que las temperaturas a la entrada y la salida del generador se empiezan a estabilizar a partir de los 70 minutos aproximadamente. Todas las temperaturas del circuito son demasiado bajas para lograr que el sistema funcione correctamente. Es necesario obtener una llama que aporte más energía. El caudal medio que se consumió durante esta prueba fue de 15'8 l/h de biogás, insuficiente para hacer funcionar el refrigerador.

Para conseguir esa llama se realizan varias modificaciones, como tratar de aumentar la presión del biogás en las garrafas o aumentar el caudal de combustible empleado. La Figura 4-1 muestra la conexión de las garrafas de biogás una prueba de combustión realizada a una presión de 13 bares. En esa prueba los datos de temperaturas obtenidos no muestran diferencias reseñables con los del Gráfico 4-1.



Figura 4-1. Conexión de las garrafas con una presión de 13 bares

Finalmente se decide utilizar un mechero Bunsen, que permite controlar el tamaño de la llama, característica de la que el quemador original del refrigerador carece. Es muy importante posicionar el mechero correctamente para que la llama se dirija lo mejor posible a la parte inferior del generador. Una pequeña variación supone la bajada de la

temperatura a la entrada y la salida del generador de varios grados. En la Figura 4-2 se observa el posicionamiento del mechero Bunsen y la llama de biogás.



Figura 4-2. Llama obtenida con biogás en el mechero Bunsen

Durante las pruebas de puesta a punto se toman datos de las temperaturas de todos los puntos mencionados anteriormente, pero se realizan menos mediciones. Cuando se observan mejoras en los resultados, con una presión de biogás en las garrafas de 7 bares y una llama de combustión de aproximadamente 10 cm de longitud, se repiten las condiciones para tomar los datos del 12 de diciembre.

Se toman datos a la salida y la entrada de cada uno de los componentes del sistema. Debido a la poca distancia de que se dispone en algunos tramos, se realiza una única medición para la salida de un componente y la entrada del siguiente, como en el caso de la salida del intercambiador-entrada al generador y la salida del generador-entrada al rectificador.

## 4.2. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS

La evaluación del funcionamiento del sistema para determinar los parámetros óptimos de funcionamiento del equipo y poder compararlo con otros sistemas requiere de un amplio conocimiento del rendimiento del sistema completo y de sus componentes individuales. Una vez obtenidos estos parámetros se puede realizar una comparación adecuada de ahorro de energía primario o de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Además del rendimiento general, en ciertos equipos se estudia el rendimiento eléctrico equivalente para realizar las comparaciones antes mencionadas. El rendimiento eléctrico equivalente (REE) se define por la legislación española como la energía eléctrica producida dividida entre la resta de la energía térmica consumida y la recuperada, dividida por la eficiencia de la misma. El REE aporta un valor añadido al precio de venta de la potencia eléctrica generada. Esto sería un importante factor si nuestro sistema produjese

electricidad y se utilizase el calor residual de esta generación como aporte calorífico en el generador del refrigerador.

$$REE = \frac{E_{el}}{\frac{E_{cons} - E_{rec}}{\eta_H}} \quad 4-1$$

En donde:  $E_{el}$  = Energía eléctrica generada, en bornes del generador  
 $E_{cons}$  = Consumo de energía primaria, PCI, de los combustibles utilizados  
 $E_{rec}$  = Energía térmica útil recuperada  
 $\eta_H$  = Valor de referencia del rendimiento para la producción separada de calor

## MODELO MATEMÁTICO

Un método muy empleado y que puede verse en muchas publicaciones es calcular el balance energético de los componentes del sistema por separado y de todos en conjunto para obtener los valores de rendimiento. Los valores de los subíndices hacen referencia a los puntos mostrados en la Figura 1-3.

Las ecuaciones para el estudio general de la máquina las distinguiremos en dos grupos, por un lado los balances de masa y por otro los balances térmicos. Comenzaremos con la ecuación diferencial de conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad 4-2$$

Al tratarse de un flujo unidireccional ( $u_j = u_k = 0 \Rightarrow |\vec{u}| = u_i$ ), se simplifica esta ecuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot u_i \cdot A - \rho \cdot \left( u_i + \frac{\partial u_i}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot A = 0 \quad 4-3$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad 4-4$$

Si estudiamos el régimen permanente ( $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ), puede simplificarse la ecuación 4-4 en la ecuación 4-5.

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = 0 \quad 4-5$$

En donde:  $\rho$  = Densidad del fluido  
 $t$  = Tiempo a lo largo del proceso de transferencia  
 $\vec{u}$  = Velocidad vectorial del fluido  
 $u_j$  = Velocidad del fluido en la dirección y  
 $u_k$  = Velocidad del fluido en la dirección z  
 $u_i$  = Velocidad del fluido en la dirección x  
 $A$  = Sección del tubo por el que circula el fluido  
 $\dot{m}_e$  = Flujo másico de entrada  
 $\dot{m}_s$  = Flujo másico de salida

El balance de energía para un volumen de control a través del cual circula un fluido en régimen estacionario se expresa como:

$$Q - W + \sum^e m_i \cdot (h + e_c + e_p)_i - \sum^s m_j \cdot (h + e_c + e_p)_j = \Delta E \quad 4-6$$

Dado que el único trabajo que sucede a lo largo del ciclo de refrigeración es el de dilatación, cuyo valor es pequeño, puede despreciarse este término. De igual manera pueden suprimirse las energías cinética y potencial tanto de entrada como de salida, por no tener grandes diferencias de altura a lo largo del refrigerador y porque los fluidos no alcanzan velocidades demasiado elevadas. Por esto, y por conservarse la energía del volumen de control, se simplifica la ecuación 4-6 en la siguiente expresión:

$$Q + \sum^e m_i \cdot h_i - \sum^s m_j \cdot h_j = 0 \quad 4-7$$

Si se escribe esta ecuación en función del tiempo, resulta la siguiente igualdad:

$$\dot{Q} + \sum^e \dot{m}_i \cdot h_i - \sum^s \dot{m}_j \cdot h_j = 0 \quad 4-8$$

La potencia calorífica considerada debe ser la potencia neta, es decir la potencia entrante menos la saliente más la potencia total generada en el volumen de control:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s + \dot{Q}_g \quad 4-9$$

Dado que en el interior del material aislante de la cámara de refrigeración no se va a generar ningún calor ( $\dot{Q}_g = 0$ ), este término puede despreciarse para simplificar la ecuación.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s \quad 4-10$$

Sustituyendo esta última igualdad en la ecuación 4-8 se obtiene la expresión que utilizaremos para el estudio del balance de energía.

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_s + \sum^e \dot{m}_i \cdot h_i - \sum^s \dot{m}_j \cdot h_j = 0 \quad 4-11$$

En donde:	$\Delta E$	= Incremento de la energía interna del sistema
	$Q$	= Energía calorífica aportada al sistema
	$W$	= Trabajo producido por el sistema
	$m_i$	= Masa i entrante en el volumen de control
	$m_j$	= Masa j saliente del volumen de control
	$h$	= Entalpía del fluido en la corriente
	$e_c$	= Energía cinética del fluido circulante por unidad de masa
	$e_p$	= Energía potencial del fluido circulante por unidad de masa
	$\dot{Q}$	= Energía calorífica aportada al sistema por unidad de tiempo

La carga total que requiere el refrigerador ( $\dot{Q}_E$ ) se calcula mediante la suma de las cargas de transmisión ( $\dot{Q}_T$ ), de los productos ( $\dot{Q}_P$ ), interna ( $\dot{Q}_I$ ) y del aire infiltrado ( $\dot{Q}_A$ ). La de transmisión representa el calor que el equipo transmite al ambiente a través de las superficies del equipo; la de los productos indica el calor que se requiere para refrigerar los productos del interior; la interna hace referencia a los equipos del interior de la cámara, tales como ventilador, motores, personas, luces, etc.; y la del aire infiltrado es el calor que debe retirarse del aire que se introduce en la cámara al abrir la puerta.

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_T + \dot{Q}_P + \dot{Q}_I + \dot{Q}_a \quad 4-12$$

Debido a las condiciones en que se ha realizado el estudio del refrigerador algunas de estas cargas pueden omitirse: las de productos, interna y de aire infiltrado. En el interior del refrigerador no hay ningún producto, el equipo no tiene componentes como motores, luces o personas que vayan a entrar en el interior, y se han tomado los datos con la puerta constantemente cerrada. Estas condiciones simplifican la ecuación 4-12, dejándola de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_T \quad 4-13$$

El cálculo de la carga de transmisión se obtiene de la suma de las cargas de las paredes frontales, laterales y techos:

$$\dot{Q}_T = \Sigma \dot{Q}_{Ti} = 2 \cdot \dot{Q}_{Tf} + 2 \cdot \dot{Q}_{Ti} + 2 \cdot \dot{Q}_{Th} \quad 4-14$$

$$\dot{Q}_{Ti} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T \quad 4-15$$

En donde:  $U_i$  = Coeficiente de transferencia de calor de la superficie i  
 $A_i$  = Área de la superficie i de aislamiento  
 $\Delta T$  = Diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de la cámara

Los valores de  $U_i$  se calculan mediante las ecuaciones 4-16, 4-17 y 4-18. Para obtener los de las componentes de estas ecuaciones se deben hallar anteriormente los términos definidos entre las ecuaciones 4-23 y 4-34. Los valores de  $A_i$  vienen determinados por las características del refrigerador, dado que se calculan con las dimensiones del mismo.

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}^V} + \frac{s_f}{k} + \frac{1}{h_{ext}^V}} \quad 4-16$$

$$U_l = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}^V} + \frac{s_l}{k} + \frac{1}{h_{ext}^V}} \quad 4-17$$

$$U_h = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}^H} + \frac{s_h}{k} + \frac{1}{h_{ext}^H}} \quad 4-18$$

En donde:  $s_i$  = Espesor de la superficie i  
 $h_{int}^V$  = Coeficiente de convección de la superficie interna para las superficies verticales  
 $h_{ext}^V$  = Coeficiente de convección de la superficie externa para las superficies verticales  
 $h_{int}^H$  = Coeficiente de convección de la superficie interna para las superficies horizontales  
 $h_{ext}^H$  = Coeficiente de convección de la superficie externa para las superficies horizontales

Antes de calcular los valores de  $U_l$  y  $U_h$  es necesario asegurarse de que los coeficientes de convección superficiales son correctos. Para ello, una vez hallados todos los valores de la ecuación 4-16, empleamos las siguientes fracciones para comprobar que las temperaturas superficiales son correctas. Estas igualdades se obtienen de la reorganización de las ecuaciones 4-19 y 4-20.

$$U_f \cdot \Delta T = h_{int}^V \cdot (T_{Si} - T_{int}) \quad 4-19$$

$$U_f \cdot \Delta T = h_{ext}^V \cdot (T_{ext} - T_{Se}) \quad 4-20$$

$$T_{Si} = T_{int} + \frac{U_{f-cong} \cdot \Delta T}{h_{int}^V} \quad 4-21$$

$$T_{Se} = T_{ext} - \frac{U_{f-cong} \cdot \Delta T}{h_{ext}^V} \quad 4-22$$

Para poder calcular el coeficiente de transferencia de calor es necesario conocer los espesores, la conductividad térmica de las paredes y los coeficientes de convección. Para obtenerlos se requiere de las expresiones de Nusselt para las condiciones de superficies verticales y horizontales, en el caso de convección natural, porque el refrigerador no consta de ningún tipo de ventilador.

$$h_i = \frac{Nu^i \cdot k}{L_i} \quad 4-23$$

En donde:  $Nu^i$  = Nusselt de la superficie i  
 $L_i$  = Longitud característica de la superficie i

El valor de  $Nu_i$  se calcula como

$$Nu^i = C_i \cdot Ra_L^n \quad 4-24$$

donde debe diferenciarse si son placas horizontales o verticales:

$$Nu_{cong}^H = 0,27 \cdot Ra_L^{1/4} \quad 4-25$$

$$Nu_{frig}^H = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4} \quad 4-26$$

$$Nu^V = 0,59 \cdot Ra_L^{1/4} \quad 4-27$$

$Ra_L$  (número de Rayleigh asociado al punto L de la longitud de la superficie) se calcula a través de los valores de Grashof para el mismo punto ( $Gr_L$ ), y Prandtl (Pr). Para que se cumplan las ecuaciones 4-25, 4-26 y 4-27, los valores de Rayleigh deben encontrarse entre  $10^6$  y  $10^{11}$  en el primer caso;  $10^4$  y  $10^7$  en el segundo; y  $10^4$  y  $10^9$  en el tercer caso. A su vez, el valor de Grashof para un punto (a la longitud x) se obtiene de la ecuación 4-29.

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad 4-28$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty| \cdot x^3}{\nu^2} \quad 4-29$$



En donde:  $g$  = Aceleración debida a la fuerza gravitatoria terrestre  
 $\beta$  = Coeficiente de expansión térmica  
 $T_s$  = Temperatura superficial de la placa  
 $T_\infty$  = Temperatura ambiental del entorno a medir  
 $x$  = Punto de la placa a la que medir el valor de las propiedades  
 $\nu$  = Viscosidad cinemática

Así, introduciendo la ecuación 4-29 en la 4-28, y ésta en las ecuaciones 4-25, 4-26 y 4-27 se tiene que los valores del número de Nusselt para las placas verticales y horizontales se obtienen de las ecuaciones 4-30, 4-31 y 4-32.

$$Nu^H_{\text{cong}} = 0,27 \cdot \left( \frac{g \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty| \cdot L^{H^3}}{\nu^2} \cdot Pr \right)^{1/4} \quad 4-30$$

$$Nu^H_{\text{frig}} = 0,54 \cdot \left( \frac{g \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty| \cdot L^{H^3}}{\nu^2} \cdot Pr \right)^{1/4} \quad 4-31$$

$$Nu^V = 0,59 \cdot \left( \frac{g \cdot \beta \cdot |T_s - T_\infty| \cdot L^{V^3}}{\nu^2} \cdot Pr \right)^{1/4} \quad 4-32$$

Los valores de las propiedades los tomaremos a la temperatura de película, que es la media entre la interior y la superficial interior y entre la ambiental y la superficial exterior:

$$T_{\text{fint}} = \frac{T_{\text{int}} + T_{\text{Si}}}{2} \quad 4-33$$

$$T_{\text{fext}} = \frac{T_{\text{Se}} + T_{\text{ext}}}{2} \quad 4-34$$

Si existiesen productos en la cámara y/o se abriese la puerta del refrigerador por alguna causa, estas cargas se calcularían como se indica a continuación.

- Carga de los productos:

Para poder calcular la carga es necesario conocer previamente dos factores: el calor que debe extraérsele al producto y el calor de respiración de los productos (este segundo factor solo se debe calcular para frutas y verduras). Como no se introducirán frutas ni verduras, solo sería necesario el primero de los factores.

$$\dot{Q}_{Pi} = \frac{\dot{m}_i \cdot c_{Pi} \cdot (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})}{3600 \cdot t} \quad 4-35$$

En donde:  $\dot{m}_i$  = Flujo másico del producto i  
 $c_{Pi}$  = Coeficiente de calor específico a presión constante del producto i  
 $t$  = Tiempo que los productos permanecen en el refrigerador

- Carga de aire infiltrado:

Se debe conocer la cantidad de aire que se renueva en el interior del refrigerador y con qué frecuencia, para saber la potencia requerida para refrigerar esa cantidad de aire.

$$\dot{Q}_a = \frac{V \cdot n \cdot (h_{\text{ent}} - h_{\text{sal}}) \cdot \rho_a^{T_{\text{ext}}}}{3600 \cdot 24} \quad 4-36$$

En donde:  $V$  = Volumen de la cámara del refrigerador  
 $n$  = Número de veces que se abre la puerta  
 $h_{ent}$  = Entalpía del aire que entra  
 $h_{sal}$  = Entalpía del aire que sale  
 $\rho_a^{Text}$  = Densidad del aire a la temperatura exterior

## APLICACIÓN DEL MÉTODO MATEMÁTICO

Valiéndonos de las ecuaciones 4-5 y 4-11 haremos los balances de masas y energía:

- Balance de masas:

- En el absorbedor:  $\dot{m}_7 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_8$  4-37
- En el condensador:  $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$  4-38
- En el evaporador:  $\dot{m}_5 = \dot{m}_6$  4-39
- En el generador:  $\dot{m}_9 = \dot{m}_1$  4-40
- $\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$  4-41
- En el intercambiador:  $\dot{m}_8 = \dot{m}_9$  4-42
- $\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$  4-43
- En el rectificador:  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{10}$  4-44

En la Figura 1-3 se observa que

$$\begin{aligned}\dot{m}_2 &= \dot{m}_3 & 4-45 \\ \dot{m}_4 &= \dot{m}_5 & 4-46 \\ \dot{m}_6 &= \dot{m}_7 & 4-47\end{aligned}$$

y se resuelven las siguientes igualdades,

$$\begin{aligned}\dot{m}_{abs} &= \dot{m}_1 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 & 4-48 \\ \dot{m}_{rica} &= \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 & 4-49 \\ \dot{m}_{pobre} &= \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} & 4-50 \\ \dot{m}_{abs} &= \dot{m}_{rica} + \dot{m}_{pobre} & 4-51\end{aligned}$$

simplificando el balance de energía.

- Balance de energía:

- En el absorbedor:  $\dot{m}_{rica} \cdot h_7 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{12} = \dot{m}_{abs} \cdot h_8 + \dot{Q}_A$  4-52
- En el condensador:  $\dot{m}_{rica} \cdot h_3 = \dot{m}_{rica} \cdot h_4 + \dot{Q}_C$  4-53
- En el evaporador:  $\dot{m}_{rica} \cdot h_5 + \dot{Q}_E = \dot{m}_{rica} \cdot h_6$  4-54
- En el generador:  $\dot{m}_{abs} \cdot h_9 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{10} + \dot{Q}_G = \dot{m}_{abs} \cdot h_1 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{11}$  4-55
- En el intercambiador:  $\dot{m}_{abs} \cdot h_8 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{11} = \dot{m}_{abs} \cdot h_9 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{12}$  4-56
- En el rectificador:  $\dot{m}_{abs} \cdot h_1 = \dot{m}_{rica} \cdot h_2 + \dot{m}_{pobre} \cdot h_{10} + \dot{Q}_R$  4-57

En donde:  $\dot{Q}_A$  = Energía calorífica cedida al ambiente en por el absorbedor  
 $\dot{Q}_C$  = Energía calorífica cedida al ambiente en por el condensador

- $\dot{Q}_E$  = Energía calorífica absorbida del interior de la cámara en el evaporador  
 $\dot{Q}_G$  = Energía calorífica absorbida del combustible en el generador  
 $\dot{Q}_R$  = Energía calorífica cedida al ambiente en por el rectificador

Como se ha indicado con anterioridad, la solución rica puede considerarse totalmente amoníaco y la solución pobre es en su mayoría agua. Esto nos permite reescribir las igualdades cambiando los subíndices rica y pobre por amoníaco y agua respectivamente, o simplificando am y ag.

Para calcular el COP es necesario calcular los valores de  $\dot{Q}_E$  y  $\dot{Q}_G$ , quedando las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_{am} \cdot (h_6 - h_5) \quad 4-58$$

$$\dot{Q}_G = \dot{m}_{abs} \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_{11} - h_{10}) \quad 4-59$$

Con estos valores, el coeficiente de operación se calcula como:

$$COP = \frac{\dot{Q}_E}{\dot{Q}_G} = \frac{\dot{m}_{am} \cdot (h_6 - h_5)}{\dot{m}_{abs} \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_{11} - h_{10})} \quad 4-60$$

En la Figura 4-3 se ve que no es posible separar las mediciones a la entrada del generador y salida del intercambiador o a la salida del generador y la entrada del rectificador, por estar los componentes demasiado próximos entre sí. Debido a esto, se tomarán como iguales las mediciones de los puntos 1 y 10 y los puntos 9 y 11.

Así mismo, dado que  $\dot{m}_{abs}$  es la suma de  $\dot{m}_{ag}$  y  $\dot{m}_{am}$ , puede modificarse la ecuación 4-59, que a su vez simplifica la ecuación 4-60:

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_G &= \dot{m}_{abs} \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_{11} - h_{10}) = \\
 &= (\dot{m}_{ag} + \dot{m}_{am}) \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_{11} - h_{10}) = \\
 &= (\dot{m}_{ag} + \dot{m}_{am}) \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_9 - h_1) = \\
 &= \dot{m}_{ag} \cdot (h_1 - h_9) + \dot{m}_{ag} \cdot (h_9 - h_1) + \dot{m}_{am} \cdot (h_1 - h_9) = \\
 &= \dot{m}_{am} \cdot (h_1 - h_9)
 \end{aligned} \quad 4-61$$

$$COP = \frac{h_6 - h_5}{h_1 - h_9} \quad 4-62$$

En donde:

$h_1$	= Entalpía a la salida del generador
$h_5$	= Entalpía a la entrada del evaporador
$h_6$	= Entalpía a la salida del evaporador
$h_9$	= Entalpía a la entrada del generador
$h_{10}$	= Entalpía a la entrada del rectificador
$h_{11}$	= Entalpía a la salida del intercambiador

A la salida del generador puede quedar parte de agua evaporada que ha sido arrastrada por el amoníaco. Para calcular el coeficiente de operación se toma el valor de entalpía considerando que únicamente hay amoníaco evaporado.

El par agua-amoniaco tiene aproximadamente un 30% de amoniaco en masa, por lo que conocemos el flujo másico en todos los ductos del circuito.

$$\dot{m}_{abs} = \frac{\dot{m}_{am}}{0,3} = \frac{\dot{m}_{ag}}{0,7} \quad 4-63$$

Los valores de entalpía de la mezcla se pueden obtener de modo similar al seguido en el desarrollo de la ecuación 4-61. La relación entre las entalpías de las sustancias que componen la mezcla y la entalpía de la misma puede resumirse como se expone en la siguiente igualdad. Para resolver la fracción nos valdremos de los valores de  $\dot{m}_{am}$  y  $\dot{m}_{ag}$  obtenidos mediante los cálculos expuestos en el ANEXO A - CÁLCULOS.

$$h_{abs} = \frac{\dot{m}_{am} \cdot h_{am} + \dot{m}_{ag} \cdot h_{ag}}{\dot{m}_{abs}} \quad 4-64$$

Ahora tomamos los datos de los espesores de las paredes de la cámara, las longitudes características de las superficies aislantes y la conductividad térmica del poliuretano expandido y del PVC (cloruro de polivinilo), material aislante y junta de goma del cierre de la puerta. Dado que el espesor de las paredes no está constituido totalmente por poliuretano expandido, para la realización de los cálculos se les resta 2 mm a cada lado.

$$\begin{aligned} S_{h-sup} &= 14'75 \text{ cm} \\ S_{l-cong.} &= 14'75 \text{ cm} \\ S_{f-cong} &= 10'75 \text{ cm} \\ S_{h-int.} &= 7'25 \text{ cm} \\ S_{h-inf} &= 5'25 \text{ cm} \\ S_{l-frig.} &= 5'25 \text{ cm} \\ S_{f-frig} &= 5'25 \text{ cm} \\ S_{junta} &= 1'5 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{alto-cong} &= 44 \text{ cm} \\ L_{alto-frig} &= 88 \text{ cm} \\ L_{ancho} &= 61'5 \text{ cm} \\ L_{profundo} &= 53'5 \text{ cm} \\ L_{junta} &= 1'5 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{pol.} &= 0'023 \text{ W / m} \cdot \text{K} \\ k_{PVC} &= 0'17 \text{ W / m} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Al tratarse de dos volúmenes separados y con distintos espesores de aislamiento, deberemos distinguirlos en los cálculos. Primero calcularemos el estado estacionario del congelador (del que se disponen de datos del arranque) y después el frigorífico, del que solo tenemos la temperatura final. No calcularemos el intercambio de energía a través de la superficie horizontal que distingue los dos volúmenes ya que no supone una pérdida por quedarse en el interior del refrigerador. Obtendremos los resultados de la junta de cierre en último lugar.

$$\begin{aligned} A_{f-cong} &= L_{alto-cong} \cdot L_{ancho} = 0'2706 \text{ m}^2 \\ A_{f-frig} &= L_{alto-frig} \cdot L_{ancho} = 0'5412 \text{ m}^2 \\ A_{l-cong} &= L_{alto-cong} \cdot L_{profundo} = 0'2354 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{l\text{-frig}} &= L_{\text{alto-frig}} \cdot L_{\text{profundo}} = 0'4708 \text{ m}^2 \\
A_h &= L_{\text{ancho}} \cdot L_{\text{profundo}} = 0'329 \text{ m}^2 \\
A_{\text{junta-cong}} &= 2 \cdot (L_{\text{ancho}} + L_{\text{alto-cong}}) \cdot L_{\text{junta}} = 0'03165 \text{ m}^2 \\
A_{\text{junta-frig}} &= 2 \cdot (L_{\text{ancho}} + L_{\text{alto-frig}}) \cdot L_{\text{junta}} = 0'04485 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L^H &= \frac{A_h}{p_h} = 0'143 \text{ m} \\
L_{\text{cong}}^V &= L_{\text{alto-cong}} = 0'44 \text{ m} \\
L_{\text{frig}}^V &= L_{\text{alto-frig}} = 0'88 \text{ m}
\end{aligned}$$

Además de estos datos se deben tener en cuenta la altitud a la que se encuentra la ciudad de Cochabamba. La Universidad Mayor de San Simón se encuentra a una altitud de aproximadamente 2500 metros sobre el nivel del mar, por lo que la presión atmosférica es de 75 kPa y la fuerza de gravedad tiene una constante de  $9'799 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ .

#### 4.3. TERMÓMETROS

La importancia de la medición de las temperaturas en distintos puntos del sistema es grande, debido a que indica el comportamiento térmico de todo el sistema. El comportamiento térmico afecta directamente al comportamiento general.

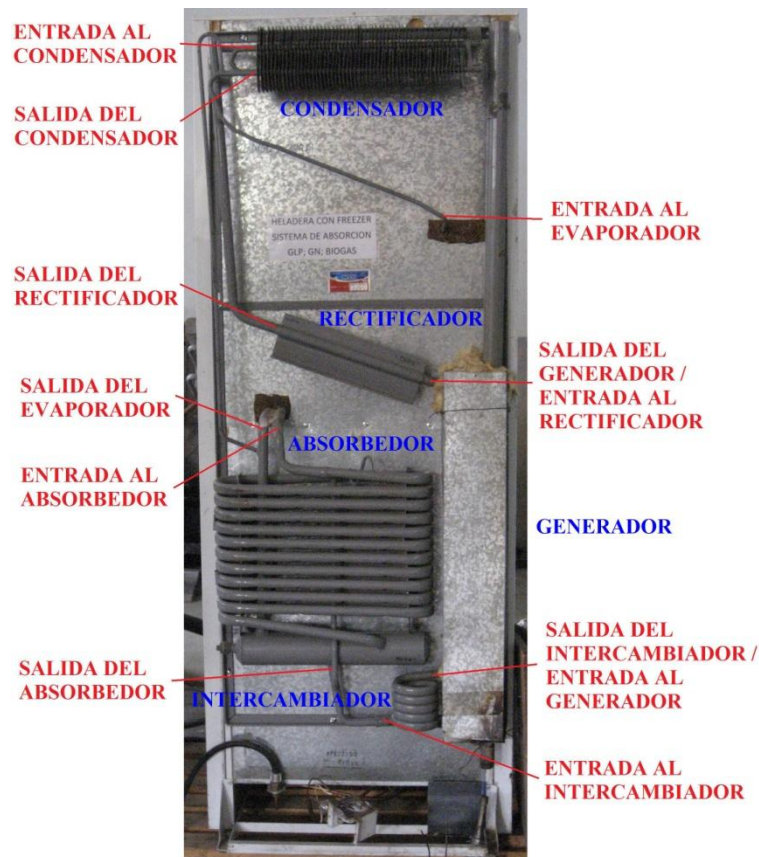


Figura 4-3. Refrigerador

Para realizar estas mediciones se han utilizado dos termómetros: el primero es un Termómetro Comark KM814FS con rangos de temperatura de -30 °C a 200 °C con precisión de  $\pm 1$  °C desde valores negativos hasta 65 °C y 1'5% de la lectura por encima de

los 65 °C; el segundo es un Módulo de Termómetro Digital Velleman PMTEMP1 capaz de medir temperaturas entre -50 °C y 70 °C con precisión de  $\pm 1$  °C.

Los puntos en los que se han tomado las mediciones a lo largo del arranque con el termómetro Comark KM814FS son:

- A la entrada y la salida del intercambiador.
- A la entrada y la salida del generador.
- A la entrada y la salida del rectificador.
- A la entrada y la salida del condensador.
- A la entrada y la salida del evaporador.
- A la entrada y la salida del absorbedor.

Debido a que las mediciones se realizan manualmente, como se observa en la Figura 4-4, la dificultad de precisar el mismo punto exacto hace que la precisión del termómetro sea mayor que la de la propia medición. Al finalizar el proceso de encendido se utiliza el termómetro Comark KM814FS para tomar la temperatura del interior del frigorífico.

Con el termómetro Velleman PMTEMP1 se han realizado las mediciones en el interior del congelador. Dado que el congelador debe mantenerse cerrado, para que no surjan cargas por la entrada de aire, introducimos el sensor del termómetro mientras el resultado se muestra en la pantalla fuera de la cámara.



Figura 4-4. Medición a la salida del rectificador con el termómetro Comark KM814FS

#### 4.4. CAUDALÍMETRO

Para conocer la cantidad de combustible empleado para un correcto funcionamiento del refrigerador se ha utilizado un gasómetro Sintta Mechanical steel case gas meter, que mide el volumen total que ha circulado por su interior.



Figura 4-5. Gasómetro Sintta Mechanical steel case gas meter conectado al refrigerador

Para conocer el caudal de cada periodo, se debe realizar la división del volumen total que ha circulado por el gasómetro en ese periodo entre ese mismo tiempo que dura el periodo.

$$C_{i+1} = \frac{V_{i+1} - V_i}{t_{i+1} - t_i} \quad 4-65$$

Por otro lado, los caudales de agua y amoníaco que circulan por el interior del sistema de refrigeración no son accesibles sin modificar el propio circuito, por lo que se obtienen sus valores mediante cálculos, como se muestra en el ANEXO A - CÁLCULOS.

#### 4.5. MECHERO BUNSEN

Como se ha expuesto anteriormente, se emplea un mechero Bunsen para realizar la combustión del biogás. Este mechero es aportación del departamento de químicas de la universidad, dado que el laboratorio de refrigeración carece de ellos. En la Figura 4-6 se muestra como se sostiene el mechero al refrigerador mediante alambres y tacos de madera.

Al utilizar el mechero Bunsen no es necesaria la conexión original del refrigerador que se utiliza con su quemador, dado que el mechero tiene su propia entrada. En caso de mantener este cambio como constante puede eliminarse la conexión original o adaptarla para que esté conectada al mechero permanentemente. Por el contrario, si quiere mantenerse la posibilidad de utilizar los dos combustibles, sería necesario disponer de dos mangueras que toleren las presiones empleadas.





Figura 4-6. Instalación del mechero

#### 4.6. RESULTADOS

	Entrada al Intercambiador
	Salida del Intercambiador / Entrada al Generador
	Salida del Generador / Entrada al Rectificador
	Salida del Rectificador
	Entrada al Condensador
	Salida del Condensador
	Entrada al Evaporador
	Salida del Evaporador
	Entrada al Absorbedor
	Salida del Absorbedor
	Cámara

Figura 4-7. Leyenda

Todas las gráficas referentes a las temperaturas del sistema de refrigeración siguen la clasificación de la leyenda mostrada en la Figura 4-7.

En la primera prueba (Gráfico 4-1) se observa que no hay capacidad de producir refrigeración. La temperatura del congelador no se reduce en ningún momento. Para obtener unos resultados más apropiados se sustituye el quemador original del refrigerador por un mechero Bunsen que permite regular el tamaño de la llama.



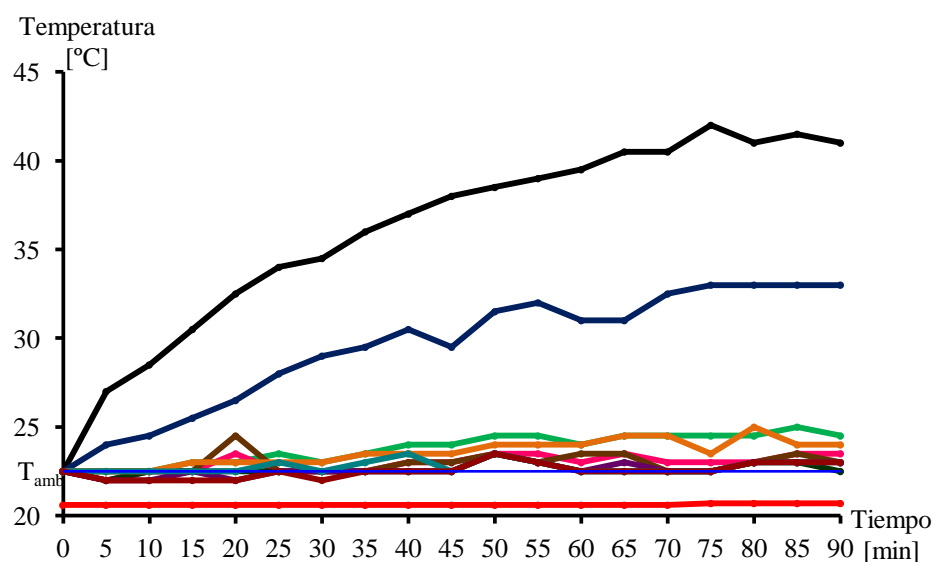


Gráfico 4-1. Temperaturas del sistema, 6 de diciembre de 2013

A pesar de que las temperaturas no se han estabilizado completamente al detener la prueba, se observa que ninguno de los puntos medidos alcanza temperaturas adecuadas para que el refrigerador arranque. En la Tabla 4-1 se muestran las temperaturas a las que se llegaría en caso de proseguir con la toma de datos.

Tabla 4-1. Tendencia de temperaturas de la primera prueba

$T_I^e$	$T_I^s$	$T_G^e$	$T_G^s$	$T_R^e$	$T_R^s$	$T_C^e$	$T_C^s$	$T_E^e$	$T_E^s$	$T_A^e$	$T_A^s$	$T_{cong}$
25	45'5	45'5	35	35	23'5	23	23	24'5	23	23	23	20'7

A medida que se reduce la cantidad de biogás almacenada debemos aumentar la salida de combustible para mantener un caudal estable y mantener un tamaño de llama constante. Con la disminución de caudal de biogás, la temperatura a la salida del generador ( $T_G^s$ ) sufre picos decrecientes (Gráfico 4-2). Al carecer de un instrumento que indique el caudal circulante a cada instante, sino que se representa el volumen total que ha atravesado el aparato, no se puede corregir el fallo rápidamente y se debe esperar a que el tamaño de la mecha muestre una disminución (Figura 4-8). La corrección se realiza abriendo un poco más la salida de gas en el regulador del mechero Bunsen.

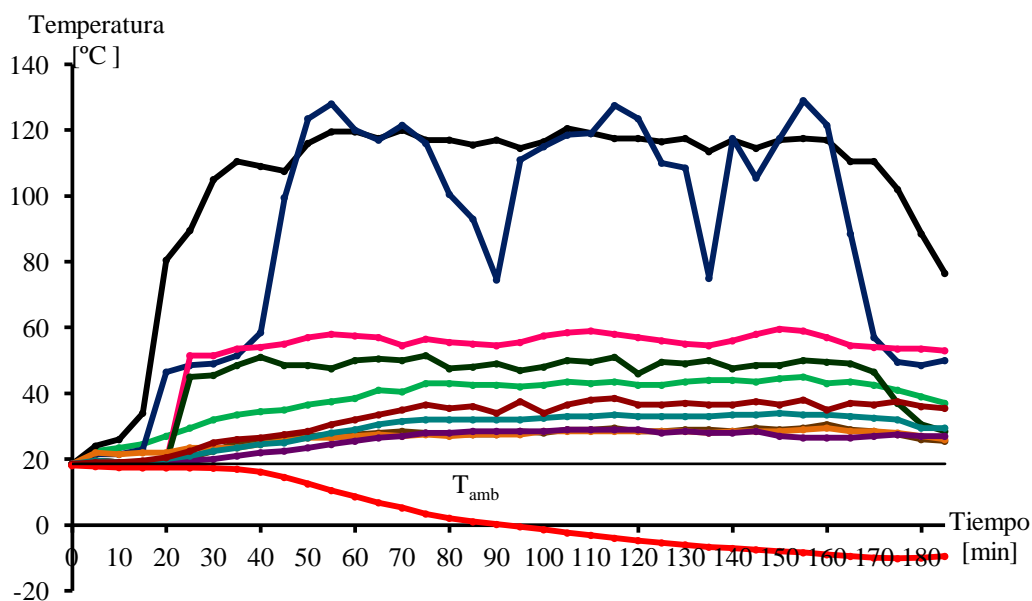


Figura 4-8. Llama al reducirse el caudal de biogás

En el ensayo realizado el 12 de diciembre de 2013 se obtiene una temperatura en el interior del congelador de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  con una temperatura ambiente de  $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Con el modelo matemático expuesto anteriormente se concluye que la energía calorífica absorbida del interior de la cámara con estas temperaturas y a un caudal constante de 120 l/h de biogás es de  $34.016\text{ W}$  con un COP del sistema es 1.402. Los caudales de amoníaco y agua que circulan por el interior de los tubos se extraen de las ecuaciones 4-58 y 4-63, dando unos valores de  $28.017 \cdot 10^{-3}$  y  $65.373 \cdot 10^{-3}\text{ g/s}$  respectivamente.

Tabla 4-2. Temperaturas del sistema estable [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_I^e$	$T_I^s$	$T_G^e$	$T_G^s$	$T_R^e$	$T_R^s$	$T_C^e$	$T_C^s$	$T_E^e$	$T_E^s$	$T_A^e$	$T_A^s$	$T_{\text{cong}}$
43,5	117	117	128	128	57	49	28,5	28	28,5	33	36,5	-10

Las temperaturas de este ensayo, una vez que el sistema se encuentra estable, se muestran en la Tabla 4-2. Se observa, que los resultados de ciertos puntos coinciden, como se ha mencionado con anterioridad, por no poder separar las mediciones. Por este mismo motivo, la poca precisión en la toma de datos, los valores indicados y los expuestos en la última fila de la Tabla A-3 de los anexos no coincide, ya que se indica un valor de la tendencia. Dadas las temperaturas de la Tabla 4-2, se obtiene el ciclo de refrigeración indicado en el Gráfico 4-3 mostrado a continuación. La leyenda se muestra bajo el gráfico.

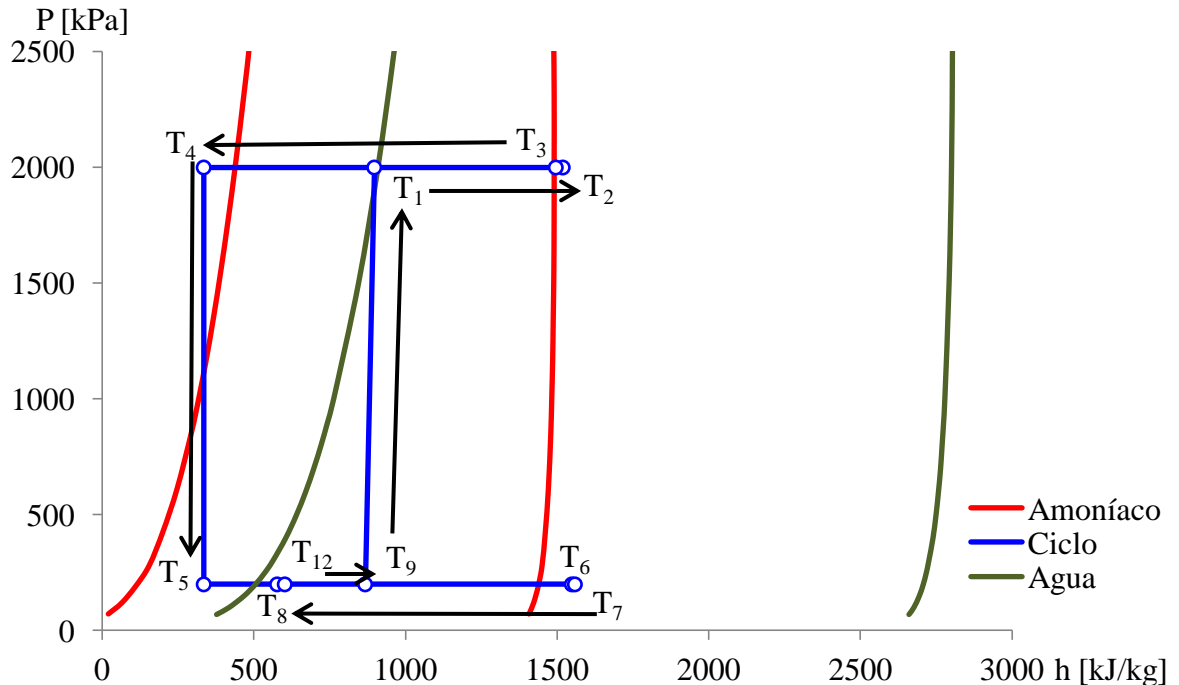


Gráfico 4-3. Ciclo de refrigeración con biogás

La temperatura en el interior del frigorífico, que únicamente se mide al completar el arranque, muestra que la temperatura desciende hasta los 4 °C, una temperatura razonable para la conservación de alimentos no congelados.



## 5. ANÁLISIS ECONÓMICO

En este apartado realizaremos un estudio del coste que supone la construcción de un biodigestor, la compra y modificaciones necesarias de un refrigerador de absorción. Los resultados obtenidos se incorporarán en el siguiente capítulo para formar parte de la comparación entre el uso de biogás y el GLP original.

### 5.1. CONSTRUCCIÓN DEL BIODIGESTOR

Según los datos obtenidos en las pruebas realizadas, el consumo de biogás que conserve constante la temperatura del refrigerador es de 120 l/h. Para obtener este caudal de gas, se requieren diariamente 2880 l. Los tamaños de biodigestores propuestos en el Plan Nacional de Biodigestores de Bolivia (PNB) dan como referencia que con una carga diaria de entre 20 y 30 kg de estiércol pueden obtenerse entre 1100 y 1500 l/día. Se sabe que el estiércol produce mayores cantidades de biogás que el plátano, a pesar de lo cual se requiere un gran biodigestor.

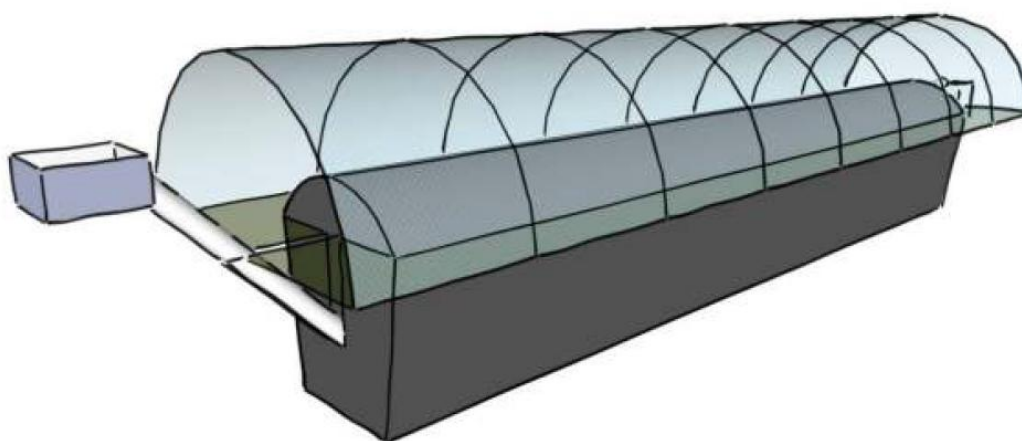


Figura 5-1. Esquema de un biodigestor tubular

Como se indica en la Tabla 5-1 obtenida del PNB de enero de 2013, existen dos tipos esenciales de biodigestores en Bolivia, pero el más utilizado es el tubular plástico. En caso de querer utilizar un biodigestor de este tipo debe construirse con un volumen total de 24'4 m<sup>3</sup>, o de 13 m<sup>3</sup> en caso de optar por el de domo fijo. Cualquiera de estos biodigestores necesita grandes cantidades de estiércol diarias para producir el biogás necesario para hacer funcionar el refrigerador.

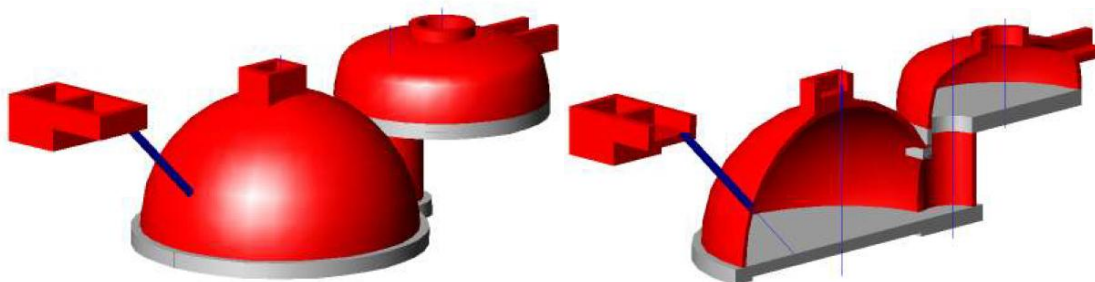


Figura 5-2. Esquema de un biodigestor de domo fijo

Tabla 5-1. Dimensiones de biodigestores

Bdg tubular plástico		Carga de estiércol diario		Bdg domo fijo	
Longitud de zanja <sup>iv</sup> [m]	Volumen total [m <sup>3</sup> ]	Valle y Trópico [kg]	Altiplano [kg]	Dimensiones <sup>v</sup> [m]	Volumen total [m <sup>3</sup> ]
5'5	7'5	30	20	2'5x2	4
8	11'25	45	30	2'75x2	6
12	16'8	67'5	45	3'25x2'25	9
17'3 (ó 2x9)	24'4	97'5	65	4'25x2'5	13

La estimación de costes de construcción del biogás se realiza siguiendo los costes indicados en el PNB de enero de 2013, en el que indica que en los costos se ha supuesto que la compra de material se hace a pequeña escala, sin rebajas por grandes volúmenes de compra.

Como se indica en la Tabla 5-2 el coste de instalación de un biodigestor de domo fijo es aproximadamente el doble que el de un biodigestor tubular plástico. Debe tenerse en cuenta a la hora de elección de biodigestor tanto el coste de construcción como la vida útil que tiene el mismo, los costes de reparación o la sustitución de los componentes con un uso saturado.

Tabla 5-2. Costes de biodigestores según tamaño y modelo

Tipo y moneda	Volumen total [m <sup>3</sup> ]			
Bdg tubular plástico	7'5	11'3	16'9	24'4
[Bs]	2888'33	3521'34	4530'02	5891'53
[€]	313'23	381'88	491'27	638'92
Bdg domo fijo	4	6	9	13
[Bs]	6353'42	7027'67	9578'97	11248'72
[€]	689'01	762'13	1038'81	1219'89

Debido a los altos costes, en Bolivia se subsidian los biodigestores para hacer más accesible esta tecnología. Estos subsidios dependen de la región en la que se construya el biodigestor, siendo mayor en el altiplano que en el trópico o el valle. Después de considerar la reducción de inversión por el subsidio, el gasto que el usuario debe hacer se muestra en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Gasto del usuario después de subsidio, por región y modelo

Tipo y región	Volumen total [m <sup>3</sup> ]			
Bdg tubular plástico	7'5	11'3	16'9	24'4
Valle y Trópico [€]	215'90	283'50	391'21	536'60
Altiplano [€]		263'22	370'93	516'32
Bdg domo fijo	4	6	9	13
Valle y Trópico [€]	474'92	546'92	819'36	997'67
Altiplano [€]		525'32	797'76	976'06

<sup>iv</sup> Para un plástico de 4'5 m de circunferencia, y zanja de 0'9 m ancho inferior, 1'15 m ancho superior, y 1'1 m de profundidad, con 20% del volumen reservado para biogás.

<sup>v</sup> Diámetro x profundidad, sin contar la cámara de compresión, que en todos los casos tiene una profundidad de 1'5 m y 3 m de diámetro, colocada anexa al tanque de digestión.

La ciudad en la que se desarrolla el proyecto es Cochabamba, que se encuentra en el valle. Como se menciona anteriormente, el biodigestor más común es el tubular plástico, que para nuestro requerimiento debe ser de 24'4 m<sup>3</sup> de volumen total. Con estas consideraciones diremos que la inversión inicial que el usuario debe hacer para construir el biodigestor es de 536'60 € (Bs 4858'60). El resto de aparatos del sistema carecen de la precisión de precio del biodigestor, por lo que se puede aproximar el gasto a 535 € (Bs 4845).



Figura 5-3. Manguera de alta presión

Para hacer llegar el biogás al refrigerador es necesario utilizar una manguera. Durante los ensayos se emplearon garrafas, por no tener una manguera suficientemente larga con capacidad para hacer circular gas a las presiones utilizadas. En caso de desarrollar el sistema a largo plazo, se instalaría una manguera de aproximadamente 50 m de longitud, que supondría un coste de 200 € (Bs 1810), aproximadamente.

## 5.2. COMPRA Y MODIFICACIONES DEL REFRIGERADOR

El refrigerador MTH-10 empleado en los ensayos puede adquirirse actualmente por aproximadamente 1150 €, nuevo. El precio desciende hasta cifras inferiores a los 800 € en caso de comprar el mismo aparato de segunda mano. La empresa MTH es de origen argentino, por lo que no es sencillo encontrar aparatos nuevos en Bolivia.

Existen otros aparatos de similares características en el mercado, como puede ser el White Westinghouse WRTW27. El valor en tienda de este refrigerador ronda los 880 €. Tiene un menor coste que el MTH-10 a pesar de tener aproximadamente 35 l más de capacidad.

Dada la variedad de productos que pueden encontrarse, es difícil hacer una elección acertada del refrigerador a comprar. Para realizar el presupuesto se toma un valor medio de 900 € (Bs 8150) considerando que el aparato sea nuevo, de modo que su vida útil sea lo mayor posible.



El precio de un mechero de tipo Bunsen se encuentra entre los 10 y los 40 €, dependiendo de ciertas características como la altura, el regulador de caudal o la entrada de aire. Como valor intermedio se considera un gasto de 25 € (Bs 225) en el quemador.

### 5.3. INVERSIÓN INICIAL TOTAL

El coste total de inversión que se requiere para instalar un biodigestor, adquirir un refrigerador a gas, adaptarlo y conectarlos supone un coste aproximado de 1660 € o Bs 15030, como se observa en la Tabla 5-4.

Tabla 5-4. Inversión inicial requerida

Sección	Precio [€]	Precio [Bs]
Construcción del biodigestor	535'00	4845
Manguera de unión	200'00	1810
Refrigerador de absorción	900'00	8150
Mechero Bunsen	25'00	225
Total	1660'00	15030

Dado que la biomasa empleada para la alimentación del digestor se obtiene de los desechos orgánicos que el usuario produce originalmente, estos no suponen ningún gasto adicional. Únicamente en caso de avería de alguno de los componentes del sistema será necesario realizar un mayor gasto.



## 6. COMPARACIÓN DE REFRIGERACIÓN CON BIOGÁS Y GLP

La primera toma de datos se realiza con GLP como combustible. Esta toma de datos nos sirve para ver las temperaturas a las que los distintos puntos del sistema deben funcionar, dado que el refrigerador ha sido diseñado para emplear esta fuente de energía.

A la hora de comparar ambos combustibles es necesario distinguir entre el aspecto técnico y el económico. Además, a la hora de elegir el sistema a implementar debe tenerse en cuenta la disponibilidad de garrafas de GLP en la región y la labor que conlleva alimentar diariamente el biodigestor con los excrementos disponibles.

### 6.1. RESULTADOS OBTENIDOS

Los datos del encendido dan como resultado una temperatura en el frigorífico de 4 °C, la misma que en el caso del biogás, y -8'6 °C en el congelador. La prueba se realiza el día 5 de diciembre, con una temperatura ambiental de 21 °C, lo que se traduce en una energía calorífica absorbida del interior de la cámara de 37'920 W, es algo superior a la del biogás por haber una mayor diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del refrigerador.

De igual manera, el valor de COP es superior en este ensayo y alcanza un valor de 1'507 mientras el coeficiente de operación con biogás se queda en 1'402. Esto se debe a que la diferencia de temperaturas a la entrada y la salida del generador, como se muestra en la Tabla 6-1. En ambos casos los valores son elevados, pero puede deberse a que las pruebas se han realizado con carga mínima.

Tabla 6-1. Temperaturas obtenidas con biogás y GLP

Combustible	$T_G^e$ [°C]	$T_G^s$ [°C]	$T_E^e$ [°C]	$T_E^s$ [°C]
Biogas	117	128	28	28'5
GLP	107	91'5	30'5	31'5

Mediante el desarrollo mostrado en el ANEXO A - CÁLCULOS se obtienen los valores de las entalpías de los puntos mencionados, y que están indicados en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Entalpías obtenidas con biogás y GLP

Combustible	$T_G^e$ [°C]	$T_G^s$ [°C]	$T_E^e$ [°C]	$T_E^s$ [°C]
Biogas	867'3	1733	334'9	1549
GLP	831'0	1626	356'6	1555

Como se observa, la relación de diferencias a la entrada y la salida de los componentes es mayor en el GLP. Tanto el divisor como el dividendo son mayores en las entalpías del biogás, pero el de la división resulta que el coeficiente es una décima mayor con GLP como combustible.



Figura 6-1. Llama de combustión con GLP

Estas diferencias de temperatura también pueden ser debidas a que para aumentar la energía absorbida del evaporador se requiere un mayor caudal de amoníaco. Dada la proporción de agua y amoníaco, también el caudal de agua se incrementa. Al circular una mayor cantidad de mezcla a través del generador, hay menos tiempo para calentarla, surgiendo así esa diferencia entre los dos combustibles a la entrada y la salida. Por otro lado, la diferencia de temperaturas en el evaporador puede ser causada por la relación de ellas en el refrigerador y el ambiente.

El biogás logra reducir más la temperatura del congelador. Por su parte, el GLP extrae una mayor cantidad de energía del interior del refrigerador además de utilizar mucha menor cantidad de combustible y un mayor coeficiente de operación. En términos energéticos, el GLP obtiene mejores resultados que el biogás.

## 6.2. COSTES

El coste de instalar el sistema completo asciende aproximadamente a los Bs 15030. En el caso de optar por el GLP, la inversión inicial desciende notoriamente, dado que no se requiere de la construcción del biodigestor ni de modificar la conexión del refrigerador. El gasto se reduce a la adquisición del refrigerador, que como se indica en el capítulo anterior asciende aproximadamente a Bs 8150, un 46% menos que con el sistema de biogás.

El inconveniente del GLP consiste en la necesidad de abastecerse de garrafas. Los lugares a los que se dirige el proyecto son zonas alejadas de las grandes poblaciones y que generalmente tienen difícil acceso. Esto hace que el precio de las garrafas se eleve en gran medida. Las garrafas de 10 kg, tienen un precio en las capitales es de Bs 22'50, mientras que en las comunidades el precio puede alcanzar valores de Bs 150 además de que la gran demanda y la poca oferta hace que la gente duerma haciendo fila para esperar al camión de reparto.

Con una proporción de 60% propano y 40% butano, la garrafa de 10 kg de GLP contiene 4865'991 l de gas. Dado el consumo del ensayo del día 5 de diciembre de 2013, de 12'454 l/h, una garrafa dura 390'717 h = 16'3 días. Si el costo de cada garrafa fuese de Bs 100, la diferencia de inversión inicial (Bs 6880) se recupera en 1121'44 días, aproximadamente 3 años. La vida útil de los componentes del sistema de biogás es de aproximadamente 4 años, que puede ser mayor con un trato adecuado. Por lo que el tiempo de uso del sistema es superior al necesario para recuperar la diferencia de la inversión inicial. En el aspecto económico el biogás es mejor que el GLP.



## 7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Es posible llevar a cabo la instalación del sistema tratado a lo largo de este texto, tanto técnica como económicamente. En Bolivia hay equipos de trabajo con gran experiencia en la construcción de biodigestores y la instalación del mechero Bunsen no requiere de conocimientos concretos, a pesar de lo que es recomendable que sea un especialista en refrigeración o combustibles gaseosos quien realice la conexión.

Económicamente es viable, dado que en un plazo de aproximadamente 3 años se comienza a tener beneficio de no depender de las garrafas de GLP, para el funcionamiento del mismo refrigerador. Teniendo en cuenta que las regiones a las que se dirige el proyecto son aisladas, no es económicamente posible usar refrigeradores conectados a la red eléctrica.

Por otro lado, se presenta la dificultad que supone la obtención de un biogás a una presión de 7 bares. Para obtener esta presión sin necesidad de un compresor eléctrico, se están desarrollando sistemas que utilizan la recirculación de los líquidos del interior del biodigestor. También puede reducirse el volumen del biodigestor para que el gas producido deba permanecer más comprimido. En el caso del biodigestor de la UMSS, para disponer de mayor presión de biogás, es necesario modificar la carpa y el sistema de hermeticidad para que el gas no escape.

En este proyecto no se ha mencionado, pero en el laboratorio de refrigeración de la Universidad Mayor de San Simón se dispone de un generador eléctrico que ha funcionado con biogás. Una alternativa al uso directo del biogás como combustible del refrigerador es utilizar el gas para hacer funcionar el generador, y que los gases de escape de éste sean los que realicen el aporte de energía térmica al sistema de absorción. La energía eléctrica obtenida del generador podría hacer funcionar el compresor, eliminando la necesidad de una fuente de electricidad externa.

En caso de mejorar la calidad de biogás obtenido, para reducir la cantidad de combustible requerido, y de lograr que el gas pueda hacerse llegar al quemador a la presión adecuada, el desarrollo de este sistema podría llegar a ser empleado. En Bolivia hay una gran cantidad de población con dificultades para obtener energía eléctrica o térmica por residir en regiones muy aisladas, y este sistema podría evolucionar con una demanda potencial tan grande.

Dadas las cifras obtenidas de cantidad de biomasa requerida para alimentar el biodigestor pudiera ser que no todos los interesados tengan la capacidad de mantener el sistema. Quizá no todos los miembros de una comunidad puedan instalar el sistema, pero la colaboración aumentaría la cantidad de residuos y reduciría el trabajo necesario para mantenerlo activo.

No solamente en regiones aisladas de Bolivia puede utilizarse el biogás como combustible en la refrigeración. En cualquier lugar, y más las áreas menos metropolitanas, producen residuos orgánicos suficientes como para alimentar biodigestores que pueden ser utilizados tanto para la obtención de refrigeración como energía eléctrica. Navarra, con las empresas ganaderas tiene un gran potencial de utilización de esta tecnología.



Debo mencionar que esta experiencia me ha supuesto mucho en el ámbito personal. Además de la labor realizada en el laboratorio y la toma de datos, el tiempo vivido en Cochabamba ha aportado también a mi persona y la forma de ver los problemas y sus posibles soluciones. La gente que conocí me acogió con mucho agrado y ayudó en todo lo que pudiera necesitar, tanto para el trabajo como para el día a día.

Pamplona, 27 de agosto de 2014

Mikel Fernández de Miguel



## BIBLIOGRAFÍA

1. Conference of the parties to the United Nations framework convention on climate change. Buenos Aires: International Institute of Refrigeration (IIR). 2004
2. R. Martinez, E. Chavez, I. López, “Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna”. En: V Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC). Noviembre 2008
3. N. Borraz Mingorance. “Simulación de una instalación de climatización con absorción y energía solar”. Universidad de Zaragoza. 2005
4. J. Roca. “Refrigerantes naturales: los equipos de absorción como alternativa ecológica en la climatización”. [www.energuia.com](http://www.energuia.com), “El Instalador”. Noviembre 2001
5. BOE nº 170, 17 de julio de 1982
6. P. Srihirin, S. Aphornratana, S. Chungpaibulpatana. “A review of absorption refrigeration technologies”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 5. 2001
7. P. Neveu. “Machine Trithermes Absorption Liquide”.  
[http://neveu.pierre.free.fr/enseigner/abs\\_liquide/cours.htm](http://neveu.pierre.free.fr/enseigner/abs_liquide/cours.htm), 2004
8. CIMNE, Hivos, SNV, Soluciones Prácticas. “Plan del Programa Nacional de Biodigestores de Bolivia”. Enero 2013
9. ASHRAE. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org), 2013
10. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT ). “Energía de la biomasa. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía”.  
[www.energiasrenovables.ciemat.es](http://www.energiasrenovables.ciemat.es), 2013
11. IDAE. “Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración”.  
[http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_prod\\_elec\\_y\\_cogeneracion\\_07\\_b5ba3c15.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_prod_elec_y_cogeneracion_07_b5ba3c15.pdf), 2013
12. OPET Network. “Micro and small-scale CHP from biomass” (<300 kWe). 2004
13. D.W. Wu, R.Z. Wang. “Combined cooling, heating and power: A review”. Progress in Energy and Combustion Science. Noviembre 2006
14. W. A. et al. “Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources”. Bioresource Technology. Marzo 2008
15. Grupo ICE electricidad. “Diseño de biodigestores y producción de electricidad”. 2011
16. I. Pilatowsky. “Tecnologías de enfriamiento”. Universidad Nacional Autónoma de México. 2004

17. L.W. Burgett, M.D. Byars, K. Schults. “Absorption Systems: The Future, More Than a Niche”. Conferencia Internacional sobre Bombas Térmicas, Alemania. 1999
18. M. Nogués. “Desarrollo de una bomba de calor de absorción a gas”.  
[www.Tdx.cesca.es/TDX-0418102-142224](http://www.Tdx.cesca.es/TDX-0418102-142224). Mayo 2001
19. [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Curva\\_de\\_crecimiento.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Curva_de_crecimiento.png). 2013
20. <http://procesosbio.wikispaces.com/Adsorci%C3%B3n>. 2013
21. <http://soluciones-eficiencia-energetica.blogspot.com.es/2010/06/frio-solar-mediante-maquinas-de.html>. 2013
22. [http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE\\_absorption\\_heat\\_pump.html](http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_absorption_heat_pump.html). 2013
23. [http://www.solerpalau.es/formacion\\_01\\_40.html](http://www.solerpalau.es/formacion_01_40.html). 2013
24. <http://www.mailxmail.com/curso-refrigeracion-domestica-manual-tecnico/condensador-funcion-refrigeracion-1>. 2013
25. <http://www.directindustry.es/prod/danfoss-refrigeration-air-conditioning/valvulas-expansion-termostaticas-acero-inoxidable-35691-557950.html>. 2013
26. <http://procesosbio.wikispaces.com/Balance+de+Energ%C3%ADa>. 2013



## ANEXOS

### ANEXO A - CÁLCULOS

#### BIOGÁS

$$\begin{aligned}T_{\text{cong}} &= -10\text{ }^{\circ}\text{C} \\T_{\text{ext}} &= 18{,}5\text{ }^{\circ}\text{C} \\T_{\text{frig}} &= 4\text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

- Congelador:

$$\Delta T = T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} = 28{,}5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Supondremos las temperaturas superficiales interior y exteriores de las paredes del congelador

$$\begin{aligned}T_{\text{S-int}} &= -6\text{ }^{\circ}\text{C} \\T_{\text{S-ext}} &= 15\text{ }^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

Con estos datos y las ecuaciones anteriores, calculamos un valor del coeficiente de transferencia de calor superficial y lo iteraremos hasta obtener un valor adecuado.

- Iteración 1:

Comenzamos con los cálculos para el interior del refrigerador:

$$T_{\text{f-int}} = \frac{-10 + -6}{2} = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$$

A esta temperatura los valores de las propiedades necesarias para los cálculos son las siguientes:

$$\begin{aligned}\text{Pr} &= 0{,}7382 \\ \nu &= 1{,}715 \cdot 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s} \\ k &= 0{,}02304\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \\ \beta &= \frac{1}{T_{\text{f-int}}} = 3{,}773 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}\end{aligned}$$

Para obtener el valor del coeficiente de expansión volumétrica ( $\beta$ ) consideraremos al aire como gas ideal.

Con los valores anteriores, de las ecuaciones 4-23 a la 4-32 se obtienen los siguientes resultados para las placas horizontales y verticales, respectivamente:

$$\begin{aligned}\text{Gr}_{\text{L-int}} &= 1470308{,}330 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 1085381{,}609 \in (10^5, 10^{11}) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{H}} &= 8{,}715 \\ h_{\text{int}}^{\text{H}} &= 1{,}404\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Gr}_{\text{L-int}} &= 42831011{,}900 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 31617852{,}984 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{V}} &= 44{,}242 \\ h_{\text{int}}^{\text{V}} &= 2{,}317\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}\end{aligned}$$

Para el exterior se siguen los mismos pasos:

$$T_{f-ext} = \frac{18,5 + 15}{2} = 16,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Determina que los valores de las propiedades sean:

$$\begin{aligned} Pr &= 0,7318 \\ \nu &= 2,008 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0,02489 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3,450 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

Realizando los cálculos, los resultados horizontales y verticales son:

$$\begin{aligned} Gr_{L-ext} &= 858123,009 & Gr_{L-ext} &= 24997668,795 \\ Ra_{L-ext} &= 627974,484 \in (10^5, 10^{11}) & Ra_{L-ext} &= 18293294,024 \in (10^4, 10^9) \\ Nu_{ext}^H &= 7,601 & Nu_{ext}^V &= 38,586 \\ h_{ext}^H &= 1,323 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} & h_{ext}^V &= 2,183 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Con los resultados logrados comprobaremos si las suposiciones son acertadas y en caso de alejarse demasiado iteraremos con unas temperaturas superficiales más aproximadas. Antes de calcular las temperaturas superficiales usaremos la ecuación 4-16 para obtener  $U_{f-cong}$ .

$$U_{f-cong} = 0,1855 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{Si} = T_{int} + \frac{U_{f-cong} \cdot \Delta T}{h_{int}^V} = -7,718 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Se} = T_{ext} - \frac{U_{f-cong} \cdot \Delta T}{h_{ext}^V} = 16,077 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

La diferencia de temperatura en la superficie externa es suficientemente grande como para requerir que realicemos otra iteración para tener datos más precisos, pero mantendremos la suposición de temperatura interna.

- Iteración 2:

Dado que carecemos de dispositivos de tanta precisión, supondremos las siguientes temperaturas superficiales:

$$\begin{aligned} T_{S-int} &= -7,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{S-ext} &= 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Comenzamos con el interior

$$T_{f-int} = -8,75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} Pr &= 0,7384 \\ \nu &= 1,706 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \end{aligned}$$



$$k = 0'02298 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'784 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 931371'518$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 687724'729 \in (10^5, 10^{11})$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^{\text{H}} = 7'775$$

$$h_{\text{int}}^{\text{H}} = 1'249 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 27131441'582$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 20033856'465 \in (10^4, 10^9)$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^{\text{V}} = 39'472$$

$$h_{\text{int}}^{\text{V}} = 2'062 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Seguimos con el exterior

$$T_{\text{f-ext}} = 17'25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0'7317$$

$$\nu = 2'014 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02493 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'444 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-ext}} = 608238'756$$

$$\text{Ra}_{\text{L-ext}} = 445048'298 \in (10^5, 10^{11})$$

$$\text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{H}} = 6'974$$

$$h_{\text{ext}}^{\text{H}} = 1'216 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-ext}} = 17718379'777$$

$$\text{Ra}_{\text{L-ext}} = 12964538'483 \in (10^4, 10^9)$$

$$\text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{V}} = 35'403$$

$$h_{\text{ext}}^{\text{V}} = 2'006 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{f-cong}} = 0'1824 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{Si}} = -7'479 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Se}} = 15'909 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Estas temperaturas son muy similares a las que hemos tomado para la iteración. Tomaremos esos valores sin necesidad de iterar de nuevo y los introducimos en las ecuaciones 4-17 y 4-18 para obtener  $U_{\text{l-cong}}$  y  $U_{\text{t}}$ .

$$U_{\text{l-cong}} = 0'1385 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{t}} = 0'1272 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Con estos resultados calcularemos las cargas de cada superficie,

$$\dot{Q}_{\text{Tf-cong}} = U_{\text{f-cong}} \cdot A_{\text{f-cong}} \cdot \Delta T = 0'1824 \cdot 0'2706 \cdot 28'5 = 1'407 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Ti-cong}} = U_{\text{l-cong}} \cdot A_{\text{l-cong}} \cdot \Delta T = 0'1385 \cdot 0'2354 \cdot 28'5 = 0'929 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tt}} = U_{\text{t}} \cdot A_{\text{h}} \cdot \Delta T = 0'1272 \cdot 0'3290 \cdot 28'5 = 1'193 \text{ W}$$

- Frigorífico:

$$\Delta T = 14'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Comenzamos suponiendo las temperaturas superficiales:

$$T_{\text{S-int}} = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{S-ext}} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Al igual que con el congelador debemos iterar para obtener las temperaturas superficiales más apropiadas.

- Iteración 1:

Primero el interior:

$$T_{f-int} = 5'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con esta temperatura obtendremos los valores necesarios para realizar los cálculos en la tabla de propiedades del aire a 75 kPa.

$$\begin{aligned} Pr &= 0'7349 \\ \nu &= 1'873 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02405 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'589 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gr_{L-int} &= 879445'697 \\ Ra_{L-int} &= 646304'643 \in (10^4, 10^7) \\ Nu_{int}^H &= 15'311 \\ h_{int}^H &= 2'575 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gr_{L-int} &= 204950476'525 \\ Ra_{L-int} &= 150618105'198 \in (10^4, 10^9) \\ Nu_{int}^V &= 65'361 \\ h_{int}^V &= 1'786 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

Ahora el exterior:

$$T_{f-ext} = 17'75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} Pr &= 0'7316 \\ \nu &= 2'020 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02497 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'438 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gr_{L-int} &= 362146'475 \\ Ra_{L-int} &= 264946'361 \in (10^4, 10^7) \\ Nu_{int}^H &= 12'251 \\ h_{int}^H &= 2'139 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Gr_{L-int} &= 84396447'574 \\ Ra_{L-int} &= 61744441'045 \in (10^4, 10^9) \\ Nu_{int}^V &= 52'300 \\ h_{int}^V &= 1'484 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_{f-frig} = 0'2992 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} T_{Si} &= 6'429 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{Se} &= 15'577 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

- Iteración 2:

Al igual que con el congelador, simplificaremos las temperaturas.

$$\begin{aligned} T_{S-int} &= 6'5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{S-ext} &= 15'5 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$T_{f-int} = 5'25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0'7350 \\ \nu &= 1'870 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02403 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'592 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 735839'325 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 540841'904 \in (10^4, 10^7) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{H}} &= 14'644 \\ h_{\text{int}}^{\text{H}} &= 2'461 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 171483720'637 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 126040534'668 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{V}} &= 62'514 \\ h_{\text{int}}^{\text{V}} &= 1'707 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$T_{\text{f-ext}} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0'7318 \\ \nu &= 2'011 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02491 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'447 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 732703'502 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 536192'422 \in (10^5, 10^{11}) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{H}} &= 14'612 \\ h_{\text{int}}^{\text{H}} &= 2'545 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 170752932'535 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 124956996'029 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{V}} &= 62'38 \\ h_{\text{int}}^{\text{V}} &= 1'766 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_{\text{f-frig}} = 0'3067 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{Si}} &= 6'605 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{\text{Se}} &= 15'982 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

- Iteración 3:

Volvemos a tomar como temperatura superficial interna los 6'5 °C, cuyos datos no necesitamos calcular.

$$\begin{aligned} T_{\text{S-int}} &= 6'5 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_{\text{S-ext}} &= 16 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$T_{\text{f-ext}} = 17'25 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0'7317 \\ \nu &= 2'014 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02493 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'444 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 608238'756 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 445048'298 \in (10^4, 10^7) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{H}} &= 13'947 \\ h_{\text{int}}^{\text{H}} &= 2'432 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-int}} &= 141747038'215 \\ \text{Ra}_{\text{L-int}} &= 103716307'862 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{int}}^{\text{V}} &= 59'541 \\ h_{\text{int}}^{\text{V}} &= 1'687 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_{\text{f-frig}} = 0'3042 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{Si}} = 6'584 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{se} = 15'885 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Hemos obtenido temperaturas con una aproximación razonable, por lo que realizaremos el resto de cálculos.

$$U_{l\text{-frig}} = 0'3042 \text{ W / m}^2\cdot\text{K}$$

$$U_s = 0'3417 \text{ W / m}^2\cdot\text{K}$$

Con estos resultados calcularemos las cargas de cada superficie:

$$\dot{Q}_{Tf\text{-frig}} = U_{f\text{-frig}} \cdot A_{f\text{-frig}} \cdot \Delta T = 0'3042 \cdot 0'5412 \cdot 14'5 = 2'387 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Tl\text{-frig}} = U_{l\text{-frig}} \cdot A_{l\text{-frig}} \cdot \Delta T = 0'3042 \cdot 0'4708 \cdot 14'5 = 2'077 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Ts} = U_s \cdot A_h \cdot \Delta T = 0'3417 \cdot 0'3290 \cdot 14'5 = 1'630 \text{ W}$$

- Junta de cierre

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor a través de la junta de PVC de la puerta, simplificaremos la ecuación 4-16 descartando las componentes debidas a la convección, resultando la ecuación A-1:

$$U_{\text{junta}} = \frac{k_{\text{PVC}}}{s_{\text{junta}}} = 11'333 \text{ W / m}^2\cdot\text{K} \quad \text{A-1}$$

$$\dot{Q}_{T\text{junta-cong}} = U_{\text{junta}} \cdot A_{\text{junta-cong}} \cdot \Delta T = 11'333 \cdot 0'03165 \cdot 28'5 = 10'223 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{T\text{junta-frig}} = U_{\text{junta}} \cdot A_{\text{junta-frig}} \cdot \Delta T = 11'333 \cdot 0'04485 \cdot 14'5 = 7'370 \text{ W}$$

Sumadas todas las cargas, adquieren el valor total de la potencia necesaria en el evaporador:

$$\dot{Q}_{T\text{-cong}} = 2 \cdot \dot{Q}_{Tf\text{-cong}} + 2 \cdot \dot{Q}_{Tl\text{-cong}} + \dot{Q}_{Tt} + \dot{Q}_{T\text{junta-cong}} = 16'088 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{T\text{-frig}} = 2 \cdot \dot{Q}_{Tf\text{-frig}} + 2 \cdot \dot{Q}_{Tl\text{-frig}} + \dot{Q}_{Ts} + \dot{Q}_{T\text{junta-frig}} = 17'928 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_E = \dot{Q}_{T\text{-cong}} + \dot{Q}_{T\text{-frig}} = 34'016 \text{ W}$$

Conocida la ecuación 4-58 podemos despejar  $\dot{m}_{am}$  para calcularlo, así como  $\dot{m}_{abs}$  y  $\dot{m}_{ag}$  de la ecuación 4-63. De la ecuación 4-62 calcularemos el COP obtenido con el biogás dado que conocemos las temperaturas y presiones de los cuatro puntos necesarios.

$$P_{\text{alta}} = 20 \text{ bar} = 2000 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{baja}} = 2 \text{ bar} = 200 \text{ kPa}$$

$$T_1 = T_G^s = 128 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_5 = T_E^e = 28 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_6 = T_E^s = 28'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_9 = T_G^e = 117 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_1 = 1733 \text{ kJ / kg}$$

$$h_5 = 334'9 \text{ kJ / kg}$$

$$h_6 = 1549 \text{ kJ / kg}$$

$$\dot{m}_{am} = \frac{\dot{Q}_E}{h_6 - h_5} = \frac{34'016}{1549 - 334'9} = 28'017 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$\dot{m}_{abs} = \frac{\dot{m}_{am}}{0'3} = \frac{28'017 \cdot 10^{-3}}{0'3} = 93'390 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$\dot{m}_{ag} = 0'7 \cdot \dot{m}_{abs} = 0'7 \cdot 93'390 \cdot 10^{-3} = 65'373 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$h_{9-am} = 1745 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{9-ag} = 491'1 \text{ kJ / kg}$$

$$h_9 = \frac{\dot{m}_{am} \cdot h_{9-am} + \dot{m}_{ag} \cdot h_{9-ag}}{\dot{m}_{abs}} = \frac{28'017 \cdot 1745 + 65'373 \cdot 491'1}{93'390} = 867'3 \text{ kJ / kg}$$

$$\text{COP} = \frac{h_6 - h_5}{h_1 - h_9} = \frac{1549 - 334'9}{1733 - 867'3} = 1'402$$

## GLP

Realizaremos el mismo procedimiento que con el biogás.

$$T_{\text{cong}} = -8'6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{ext}} = 21 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{frig}} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Congelador:

$$\Delta T = 29'6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-int} = -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-ext} = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Iteración 1:

$$T_{f-int} = -7'3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0'738$$

$$\nu = 1'723 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02309 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'763 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr}_{L-int} = 944336'729$$

$$\text{Ra}_{L-int} = 696920'506 \in (10^5, 10^{11})$$

$$\text{Nu}_{int}^H = 7'801$$

$$h_{int}^H = 1'26 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Gr}_{L-int} = 27509126'38$$

$$\text{Ra}_{L-int} = 20301735'269 \in (10^4, 10^9)$$

$$\text{Nu}_{int}^V = 39'604$$

$$h_{int}^V = 2'078 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{f-ext} = 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0'7315$$

$$\nu = 2'023 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02499 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'435 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 1443032'447 & \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 42036448'147 \\ \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 1055578'235 \in (10^5, 10^{11}) & \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 30749661'819 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{H}} &= 8'654 & \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{V}} &= 43'935 \\ h_{\text{ext}}^{\text{H}} &= 1'512 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} & h_{\text{ext}}^{\text{V}} &= 2'495 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_{\text{f-cong}} = 0'1858 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{Si}} = -5'954 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Se}} = 18'796 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Iteración 2:

$$T_{\text{S-int}} = -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{S-ext}} = 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{f-ext}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0'7309 \\ \nu &= 2'048 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02514 \text{ W / m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'411 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 581574'798 & \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 16970772'461 \\ \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 425803'920 \in (10^5, 10^{11}) & \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 12403937'591 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{H}} &= 6'897 & \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{V}} &= 35'014 \\ h_{\text{ext}}^{\text{H}} &= 1'213 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} & h_{\text{ext}}^{\text{V}} &= 2'001 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$U_{\text{f-cong}} = 0'1824 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{Si}} = -6'001 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{Se}} = 18'301 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Iteración 3:

$$T_{\text{S-int}} = -6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{S-ext}} = 18'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{f-ext}} = 19'75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= 0'731 \\ \nu &= 2'045 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s} \\ k &= 0'02512 \text{ W / m} \cdot \text{K} \\ \beta &= 3'4144 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 584799'201 & \text{Gr}_{\text{L-ext}} &= 17035570'726 \\ \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 427488'216 \in (10^5, 10^{11}) & \text{Ra}_{\text{L-ext}} &= 12453002'201 \in (10^4, 10^9) \\ \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{H}} &= 6'904 & \text{Nu}_{\text{ext}}^{\text{V}} &= 35'049 \end{aligned}$$

$$h_{\text{ext}}^H = 1'213 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$h_{\text{ext}}^V = 2'001 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{f-cong}} = 0'1825 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{Si}} = -6'001 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{Se}} = 18'301 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_{\text{l-cong}} = 0'1385 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_t = 0'1273 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

Con estos resultados calcularemos las cargas de cada superficie,

$$\dot{Q}_{\text{Tf-cong}} = 1'462 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tl-cong}} = 0'965 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Tt}} = 1'240 \text{ W}$$

- Frigorífico:

$$\Delta T = 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Iteración 1:

$$T_{\text{S-int}} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{S-ext}} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{\text{f-int}} = 4'5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0'7351$$

$$\nu = 1'861 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02397 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'602 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 297988'46$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 219051'317 \in (10^4, 10^7)$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^H = 11'682$$

$$h_{\text{int}}^H = 1'958 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 69444739'007$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 51048827'644 \in (10^4, 10^9)$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^V = 49'871$$

$$h_{\text{int}}^V = 1'358 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{\text{f-ext}} = 19'5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Pr} = 0'7311$$

$$\nu = 2'042 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'0251 \text{ W / m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'417 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 704441'005$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 515016'819 \in (10^4, 10^7)$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^H = 14'466$$

$$h_{\text{int}}^H = 2'539 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\text{Gr}_{\text{L-int}} = 164166497'327$$

$$\text{Ra}_{\text{L-int}} = 120022126'196 \in (10^4, 10^9)$$

$$\text{Nu}_{\text{int}}^V = 61'754$$

$$h_{\text{int}}^V = 1'761 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_{\text{f-frig}} = 0'2930 \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}$$



$$T_{Si} = 7'667 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Se} = 18'172 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Iteración 2:

$$T_{S-int} = 7'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{f-int} = 5'75 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Pr = 0'7348$$

$$\nu = 1'876 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02407 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'586 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\begin{array}{ll} Gr_{L-int} = 1021886'194 & Gr_{L-int} = 238145530'772 \\ Ra_{L-int} = 750881'975 \in (10^4, 10^7) & Ra_{L-int} = 174989336'011 \in (10^4, 10^9) \\ Nu_{int}^H = 15'896 & Nu_{int}^V = 67'859 \\ h_{int}^H = 2'676 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} & h_{int}^V = 1'856 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{array}$$

$$U_{f-frig} = 0'3110 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{Si} = 7'002 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{Se} = 18'151 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Iteración 3:

$$T_{S-int} = 7 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{f-int} = 5'5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Pr = 0'7349$$

$$\nu = 1'873 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$k = 0'02405 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3'589 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$\begin{array}{ll} Gr_{L-int} = 879445'697 & Gr_{L-int} = 204950476'525 \\ Ra_{L-int} = 646304'643 \in (10^4, 10^7) & Ra_{L-int} = 150618105'198 \in (10^4, 10^9) \\ Nu_{int}^H = 15'311 & Nu_{int}^V = 65'361 \\ h_{int}^H = 2'575 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} & h_{int}^V = 1'786 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K} \end{array}$$

$$U_{f-frig} = 0'3090 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$T_{S-int} = 6'941 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{S-ext} = 18'018 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$U_{l-frig} = 0'3090 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$U_s = 0'3459 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\dot{Q}_{Tf-frig} = 2'843 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Tl-frig} = 2'473 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Ts} = 1'935 \text{ W}$$

- Junta de cierre

$$\dot{Q}_{Tjunta-cong} = 10'618 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{Tjunta-frig} = 8'641 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{T-cong} = 16'712 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{T-frig} = 21'208 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_E = 37'920 \text{ W}$$

$$C_{medio-GLP} = 12'454 \text{ l / h} = 3'459 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$T_1 = 91'5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_5 = 30'5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_6 = 31'5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_9 = 107 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_1 = 1626 \text{ kJ / kg}$$

$$h_5 = 356'6 \text{ kJ / kg}$$

$$h_6 = 1555 \text{ kJ / kg}$$

$$\dot{m}_{am} = 31'642 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$\dot{m}_{abs} = 105'473 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$\dot{m}_{ag} = 73'831 \cdot 10^{-3} \text{ g / s}$$

$$h_{9-am} = 1723 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{9-ag} = 448'7 \text{ kJ / kg}$$

$$h_9 = 831'0 \text{ kJ / kg}$$

$$COP = 1'507$$

## **ANEXO B - DISPOSITIVOS**

### **FRIGORÍFICO**

#### **HELADERA CON FREEZER MTH – 10**



## Heladeras y Freezers a Absorción



### Características

Las heladeras y freezers son armados con mecheros a gas, totalmente seguras ya que están equipadas con una válvula de seguridad y poseen un encendido electrónico que permiten prenderlas con comodidad.

El proceso de refrigeración por absorción posee importantes ventajas:

No contiene partes móviles.  
Realiza conversión directa de calor/frío.

No genera ruido

Los gabinetes son de chapa pre-pintada, el interior en plástico PAI con rejillas de alambre, crisper transparente.

Los equipos de refrigeración están contruidos con tubos de acero 1010, tratados especialmente para el sistema de refrigeración por absorción. La pre-

sión de prueba a que son sometidos es de 60 kg x cm<sup>2</sup>. La presión en funcionamiento es de 20 kg x cm<sup>2</sup>. Pintados por inmersión (sistema catalítico) y galvanizados en caliente.

### Datos Técnicos

Tipo	Modelo	Capacidad	Medidas en cm Alto x ancho x Prof	Tipo de puerta
Heladera	H8	8 pies	120 x 61,5 x 66 Interior 88 x 50 x 42	Frontal
Heladera	H10 (2P)	10 pies	164 x 61,5 x 66 Heladera 88 x 50 x 42 Freezer 44 x 32 x 32	2 Frontal
Freezer	F140	140 litros	103 x 82 x 75 Interior 68,5 x 58 x 38	Horizontal
Freezer	F220	220 litros	103 x 104 x 75 Interior 68,5 x 98 x 38	Horizontal

Todos los datos son ilustrativos, el fabricante se reserva el derecho de modificarlos sin previo aviso.



**Ecosolar s.a.**

<http://www.ecosolarsa.com> email: [ecosolar@ecosolarsa.com](mailto:ecosolar@ecosolarsa.com)

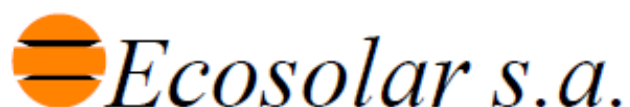
Distribuidor Solar de

**SHURflo**  
First in Fluid Innovation

**IBC**  
SOLAR

**GRUNDFOS**

Monroe 2630 piso 6º B  
1428 - Buenos Aires  
Tel. (011) 4545-4679



# Manual del Usuario e Instalador de Equipos de Absorción

*Ecosolar* es marca registrada de *Ecosolar s.a.*

Monroe 2630 piso 6º B  
C1428BLR - Buenos Aires  
República Argentina  
Teléfono. ++054 – 11 - 4545-4679  
Email: [ecosolar@ecosolarsa.com](mailto:ecosolar@ecosolarsa.com)

Editado por *Ecosolar s.a.*

Página 1

## Indice

1. Introducción.....	3
2. Recomendaciones para el uso del freezer y heladera.....	3
3. Descripción de la parte posterior del equipo.....	4
4. Ubicación.....	5
5. Instalación.....	5
6. Nivelación.....	5
7. Encendido.....	6
8. Consejos importantes.....	7
9. Carga de alimentos.....	7
10. Importante para los freezers.....	7
11. Limpieza del quemador y tiraje de caldera.....	8
12. Mantenimiento.....	8
13. Garantía.....	9

## 1. Introducción

El objeto del presente manual es evitar dificultades en la puesta en marcha, uso y mantenimiento de su equipo a absorción, prolongar su vida útil y obtener un óptimo resultado.

Cualquier duda que tenga no deje de consultarla con su distribuidor o el Departamento Técnico de Ecosolar s.a.. En este tipo de instalaciones las recomendaciones realizadas son importantes para el mejor aprovechamiento del equipo y evitar posibles daños.

Recomendamos la lectura atenta de las instrucciones contenidas en este manual, la correcta interpretación y aplicación de las instrucciones harán que su equipo a absorción funcione correctamente.

En el caso de los freezers a absorción le permitirán:

- ❖ Almacenar alimentos.
- ❖ Ahorro de dinero por compras de productos de temporada.
- ❖ Conservar piezas de caza, pesca o de matadero para elaborar alimentos en el momento más adecuado.
- ❖ Almacenar alimentos naturales sin utilizar conservantes.

Tenga siempre este manual a mano por cualquier duda o consulta que pueda surgir.

## 2. Recomendaciones para el uso del freezer y heladera.

En los freezers se pueden congelar alimentos crudos, pero una vez descongelados solo podrán volver a congelarse si se cocinan previamente.

Los alimentos una vez descongelados deberán consumirse en el menor tiempo posible.

Los productos que se ingresen al freezer o heladera deberán estar a una temperatura no mayor a la ambiente.

La apertura del equipo ya sea para la carga o descarga de alimentos deberá realizarse en el menor tiempo posible para evitar de esta forma la pérdida de frío.

En el caso de no utilizar el equipo por un tiempo, limpie su interior con agua y bicarbonato (una cucharada sopera en un litro de agua) y manténgalo con la puerta/tapa abierta.

Par obtener un buen rendimiento del equipo, limpie cada 6 meses el tiraje de caldera (Ver figura 1).



### 3. Descripción de la parte posterior del equipo.

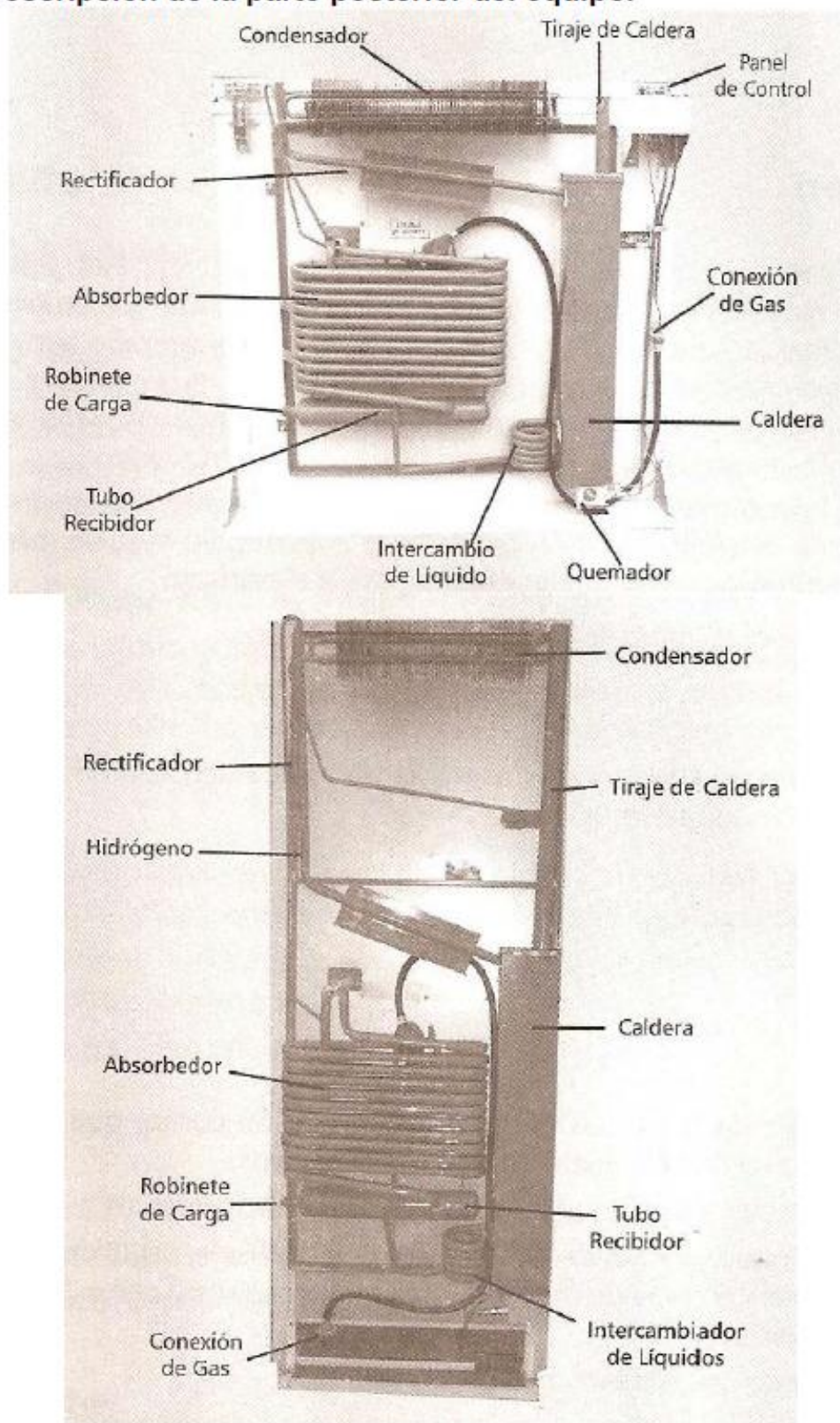


Figura 1



#### 4. Ubicación.

Aconsejamos ubicar el equipo de absorción en una habitación fresca y aireada.

La parte posterior de la unidad deberá estar separada de la pared unos 10 cm. También se debe dejar espacio entre los laterales de la unidad y las paredes del lugar, de esta forma el calor que emana el equipo circulará correctamente y no afectará al mismo.

El equipo no debe estar expuesto a los rayos solares, ni a ninguna otra fuente de calor en forma directa o indirecta.

#### 5. Instalación.

Cuando el equipo es alimentado con gas envasado (en general garrafas de 10 ó 15 kg) utilice el regulador de presión que viene con el mismo.

Cuando alimente el equipo con gas a granel o cilindros de 45 kg, realice una instalación con cañería para gas (caños de hierro galvanizado ó termo-fusión) hasta la toma de gas. Asegúrese de colocar una llave de paso al alcance de la mano para regular el corte y provisión de gas a la unidad. En este caso no es necesario el regulador de presión ya que el gas a granel ya trae ese control.

Si desea alimentar el equipo con gas natural, deberá llamar a un gasista matriculado.

Es sumamente importante que la presión de gas que alimente al equipo sea de 280 mm de columna de agua con una presión atmosférica normal (760 mm de mercurio). Para chequear esto en forma "práctica": Llenar un balde de agua, colocar la manguera de salida del regulador, hundir la manguera hasta el fondo, e ir sacándola lentamente. La misma debe empezar a burbujear a los 28 cm debajo de la superficie del agua. Si lo hace antes o después, regular el tornillo de ajuste del regulador (generalmente debajo de una tapa plástica de protección).

Una vez realizada la conexión del gas deje estabilizar el equipo de absorción por unas 2 horas antes de proceder a su encendido.

**NOTA IMPORTANTE:** Aconsejamos que las tareas de instalación de gas sean efectuadas por personal idóneo: gasistas matriculados.

#### 6. Nivelación.

**Es imprescindible la perfecta nivelación de la unidad: En caso de que no esté perfectamente nivelada puede dejar de funcionar el equipo.**

Para lograr una nivelación adecuada proceda de la siguiente forma:

1. Abra la unidad y coloque un nivel de los utilizados en albañilería según lo indicado en la figura 2: en el lateral y el respaldo. Con las patas a rosca que tiene la unidad proceda a nivelarlo. Si el desnivel fuese excesivo suplemente con patines.



Figura 2

2. Si la habitación tuviera piso de tierra o muy desparejo, recomendamos colocar una base firme. Se debe asentar la unidad sobre sus cuatro patas sin que se balancee.
3. Es conveniente verificar el nivel en forma periódica, ya que por el uso puede que este varíe. Cuando mude el equipo de lugar debe tener en cuenta que deberá a nivelarlo correctamente.

## 7. Encendido.

1. Abra la llave de paso del gas.
2. Coloque la perilla del regulador en la posición MAXIMO.
3. Mantenga presionada la perilla del regulador de temperatura hacia adentro y accione el botón de encendido electrónico (puede que deba accionarlo repetidas veces) hasta que se encienda el quemador ubicado en la parte posterior del gabinete. Una vez prendido el mismo mantenga presionada la perilla por un minuto, suéltela lentamente (pues puede apagarse si se hace bruscamente). Luego coloque la perilla en la posición MINIMO.



4. Deje la perilla en MINIMO durante 30 minutos y luego llévela a MAXIMO.
5. Verificar en el momento del encendido que la parte inferior del absorbedor tenga mayor temperatura que la parte superior, en caso contrario: apagar el equipo, esperar dos horas y volver a ponerlo en marcha.

## 8. Consejos importantes.

Por los movimientos a los que estuvo sometido el equipo hasta su llegada a destino, puede suceder que el equipo al encenderse por primera vez el sistema de refrigeración trabaje en sentido inverso, es decir produciendo calor en el interior del gabinete. Si esto sucede, colocar la perilla del regulador de temperatura en la posición de CERRADO; dejar enfriar el equipo por unas horas y proceder a encender nuevamente el equipo.

Aconsejamos revisar en forma periódica la manguera de suministro de gas, ya que estas a lo largo del tiempo pueden researse y resquebrajarse dando lugar a pérdidas de gas que a su vez pueden producir explosiones y/o incendios.

## 9. Carga de alimentos.

El sistema de refrigeración por absorción produce un enfriamiento continuo pero en forma lenta, no se debe esperar una respuesta rápida de enfriamiento.

Antes de cargar alimentos por primera vez dentro del equipo este deberá estar funcionado durante 12 horas con únicamente dos cubeteras de agua en su interior. Luego de este tiempo se podrá incorporar alimentos en forma escalonada.

Se recomienda que la carga de alimentos se realice contra las paredes del equipo, dejando canales de circulación de aire por donde pueda circular el frío.

## 10. Importante para los freezers.

- A. Asegúrese que la tapa del freezer tenga cierre perfecto.
- B. Abra la menor cantidad de veces posible la tapa del freezer.
- C. No exceda el límite de carga.
- D. Envase los alimentos en recipientes y/o bolsas herméticas y aspire el aire contenido en las mismas lo más que pueda.
- E. Evite congelar líquidos en recipientes abiertos, ya que esto favorece la formación de escarcha.
- F. Los líquidos al congelarse aumentan de volumen. NO coloque líquidos en envases de vidrio, la presión romperá los envases.



## 11. Limpieza del quemador y tiraje de caldera.

1. Apague el equipo.
2. Coloque un papel sobre el quemador.
3. Dentro del tubo de tiraje se encuentra el deflector (sostenido por un gancho de alambre) páselo varias veces por el recorrido del tubo. Vuelva a colocarlo en su posición original (no modifique su altura).
4. Retire el papel que colocó sobre el quemador con las impurezas que cayeron del tubo.

## 12. Mantenimiento.

La humedad del aire que ingresa cada vez que se abre la puerta/tapa del equipo se condensa en forma de escarcha en las paredes del gabinete. Esta escarcha se convierte en hielo que actúa de aislante, lo que reduce en un bajo rendimiento del equipo. Por lo que es muy importante descongelar el equipo cuando el hielo acumulado en las paredes tenga un espesor de 10 mm.

El descongelamiento se deberá realizar en el menor tiempo posible a fin de que los alimentos no sufran un deterioro en su calidad. El ideal es que no dure más de 45 minutos.

Para descongelar proceda de la siguiente forma:

1. Ponga la perilla del regulador en la posición CERRADO.
2. Saque los alimentos del equipo y envuélvalos en abundante papel, a fin de que mantengan la temperatura el mayor tiempo posible; colóquelos en un lugar fresco.
3. Introduzca en el equipo recipientes de agua tibia. La elevación de la temperatura interior hará que el hielo adherido se descongele y se desprenda.
4. No utilice elementos cortantes ni puntiagudos para acelerar el proceso de descongelamiento pues puede provocar pinchaduras en el circuito de refrigeración.
5. Una vez retirado el hielo de las paredes, secar el agua resultante y lavar el interior con una solución de agua y bicarbonato de sodio (una cucharada sopera por litro de agua).
6. Una vez enfriada la parte posterior del equipo, limpiar el polvo acumulado que pudiera haberse acumulado.

7. Cuando vuelva a prender el equipo, la llama del quemador debe ser azulada. Una llama amarillenta puede significar mala combustión por suciedad en el quemador, si esto sucede proceda a limpiar el quemador.

### MUY IMPORTANTE

En caso de tener el equipo alguna pérdida (se siente olor a amoníaco) solo deberá ser reparado por personal especializado.

NO utilizar jamás ningún tipo de soldadura.

**POR NINGUN MOTIVO CORRE RIESGO DE EXPLOSION**

## 13. Garantía.

Es la que brinda MTH SRL en su fábrica, en la documentación que se encuentra dentro del equipo de absorción y es por defectos de fabricación, hasta los 6 meses posteriores a su compra. Durante este período, MTH SRL se compromete a reparar o reemplazar el equipo de absorción dañado sin cargo para el cliente. Esta garantía será anulada, si el equipo de absorción ha sufrido alguna alteración o destrucción física, interna o externa, tampoco cubre el daño causado por uso impropio o por ser utilizado en un ambiente no adecuado.

Esta garantía no será aplicable, si el equipo de absorción ha sido utilizado en aplicaciones para las que no ha sido fabricado, si ha sido instalado incorrectamente, o si ha sido reparado por alguna persona ajena a MTH SRL. Para mantener la garantía, el producto no debe ser desarmado o modificado sin la autorización expresa y por escrito de MTH SRL.

Ecosolar s.a. no asume responsabilidades por daños emergentes o consecuentes, daños causados por el mal uso o instalación de cualquier elemento no autorizado.

Asimismo no será aceptada responsabilidad alguna por los inconvenientes, daños o perjuicios que pudiera producir el uso del equipo al comprador o a terceras personas bajo cualquier circunstancia.

Ecosolar s.a. no aceptará reclamos por lucro cesante, daños y perjuicios por la no-disposición del equipo antes, durante y después del período necesario para realizar las reparaciones al mismo.

La expresada en los párrafos anteriores es la única garantía de Ecosolar s.a.. Ecosolar s.a. no da garantías especiales, expresas ni implícitas, tampoco da garantías por eventos o situaciones especiales.

## TERMÓMETROS

COMARK KM814FS



# Comark KM814FS Thermometer

The Comark Infra red thermometers measure surface temperatures and can be used throughout the food industry, anywhere that non-contact measurement is required.

Infra red temperature measurement prevents wastage of the measured material, and enables checks on areas where access is difficult.

The KM814FS is pocket sized and offers fast, convenient and safe measurements. It has a range and accuracy ideally suited to food industry HACCP requirements.

- **Laser sighting** to pinpoint target area
- **Pocket sized** and easy to use
- **Fast safe** surface temperature measurement
- **Backlit LCD display**
- **Displays temperature** in °C or °F
- **Emissivity pre-set at 0.97**, optimised for food use
- **Hold function** freezes displayed reading
- **Protective pouch** available, ref: 17275
- **Ratio of Distance** to spot size 4:1



Comark is the leading manufacturer and supplier of a wide range of electronic measurement instruments for temperature, humidity, pressure and pH.



**2-Year  
Warranty**

Temperature Measurement	
Measurement Range	-30°C to +200°C, -25°F to +400°F
Scales	°C and °F
Instrument Accuracy at +23°C for targets below 0°C 0°C to +65°C above +65°C	±1°C +0.1% ±1°C ±1.5% of reading
Accuracy at +73°F for targets below +32°F +32°F to +150°F above +150°F	±2°F +0.1% ±2°F ±1.5% of reading
Repeatability	±0.5% of reading or ±1°C/2°F, whichever is greater

General	
Display Hold	7 seconds
Operating Temperature Range	0°C to +50°C, +32°F to +122°F
Ratio of Distance to Spot Size	4.1
Emissivity	Pre-set at 0.97
Battery Type	9V IEC 6LF22 alkaline
Weight	227g
Dimensions	L 101mm x W 38mm x H 152mm

# Technical Specification

## WARRANTY

All Comark Instruments have a minimum one year warranty unless otherwise stated. The warranty period for temperature probes is for six months and all other probes and electrodes are unwarranted because the conditions of use are beyond our control. The Comark warranty covers manufacturing defects and component failures on all products returned to Comark premises and applies worldwide. The warranty does not affect your statutory rights. In line with our policy of continuous development we reserve the right to alter any product specifications without notice. All products are covered by our Quality Management System which is compliant with BS EN ISO 9001:2008 for the design, manufacture, supply, service, repair and recalibration of electronic measuring instruments and equipment.

## BIOCOTE®

Selected Comark thermometers, probes and data loggers have BioCote's silver technology incorporated into instrument cases and probe handles at the time of manufacture. The antimicrobial finish inhibits the growth of bacteria, reducing the risk of cross-contamination and infection in the environment and is becoming accepted within HACCP and due diligence procedures as an important extra level of defence.

Distributed by:

C214/1/EN © Comark Instruments

**Comark Instruments**  
Bury Mead Road, Hitchin,  
Hertfordshire SG5 1RT, UK

Tel: 0844 (+44 844) 815 6599  
Fax: 0844 (+44 844) 815 6598

Email: salesuk@comarkltd.com – UK and Ireland  
salesint@comarkltd.com – International

**Comark Instruments (USA)**

PO Box 500  
Beaverton, OR 97077, USA

Tel: (800) 555 6658  
Fax: (503) 644 5859

Email: sales@comarkusa.com - USA



**COMARK**

A Fluke Company

Click on [www.comarkltd.com](http://www.comarkltd.com) or [www.comarkusa.com](http://www.comarkusa.com) for more information



°C/°F AND BATTERY

## OPERATING THE UNIT

Be sure to consider distance-to-spot size ratio and field of view. If the unit is equipped with a laser, use the laser only for aiming. See How to Accurately Measure Temperature.

The backlit LCD displays the current temperature in Celsius or Fahrenheit. The unit will hold the reading for 7 seconds after trigger is released; the word HOLD appears. The presence of the battery icon indicates a low battery.

## LOCATING A HOT SPOT

To find a hot spot, aim the thermometer outside the area of interest, then scan across with an up and down motion until you locate the hot spot.

Make sure that the target is larger than the unit's spot size. The smaller the target, the closer you should be to it. When accuracy is critical, make sure the target is at least twice as large as the spot size.

As the distance from the object increases, the spot size of the area measured by the unit becomes larger.

- Not recommended for use in measuring shiny or polished metal surfaces (stainless steel, aluminum, etc.). See Emirsley.
- The unit cannot measure through transparent surfaces such as glass. It will measure the surface temperature of the glass instead.
- Steam, dust, smoke, etc., can prevent accurate measurement by obstructing the unit's optics.

(units with laser sighting)

- EMF (electromagnetic fields) from arc welders, induction heaters

- Static electricity
- Thermal shock (caused by large or abrupt ambient temperature changes—allow 30 minutes for unit to stabilize before use)
- Do not leave the unit on or near objects of high temperature

We are confident you will find many uses for your handheld non-contact thermometer. Compact, rugged, and easy to use—just aim, pull the trigger, and read current surface temperature in less than a second.

You can safely measure surface temperatures of hot, hazardous or hand-to-reach objects without contact.

The units measure the surface temperature of an infrared thermometer, measure the surface temperature of an object. The units optics sense emitted, reflected, and transmitted energy, which is collected and focused onto a detector. The electronics translate the information into a temperature reading which is displayed on the unit. In units with a laser, the laser is for aiming purposes only.

**This instrument conforms to the following standards:**

- EN60081-1:1992, Electromagnetic Emission
- EN60082-1:1992, Electromagnetic Susceptibility

Tests were conducted using a frequency range of 27–500 MHz with the instrument in trace observations. The average error for the three orientations is  $\pm 4.8^\circ\text{C}$  ( $\pm 6.7^\circ\text{F}$ ) at 3 V/m throughout the spectrum. However, between 150 MHz and 500 MHz at 3 V/m, the instrument may not meet its stated accuracy.

All Coram Instruments have a minimum one year warranty unless otherwise stated. The warranty period for temperature probes is for six months and all other probes and electrodes are unwarranted because the conditions of use are beyond our control.

The Connaught warranty covers manufacturing defects and component failure and applies worldwide. The warranty does not affect your statutory rights. In line with our policy of continuous development we reserve the right to alter any product specifications without notice.

[illegible]

NONCONTACT THERMOMETERS



VELLEMAN® PMTEMP1



# velleman®



## PMTEMP1 – DIGITAL THERMOMETER MODULE

### 1. Introduction

To all residents of the European Union

Important environmental information about this product



This symbol on the device or the package indicates that disposal of the device after its lifecycle could harm the environment. Do not dispose of the unit (or batteries) as unsorted municipal waste; it should be taken to a specialized company for recycling. This device should be returned to your distributor or to a local recycling service. Respect the local environmental rules. If in doubt, contact your local waste disposal authorities.

Thank you for choosing Velleman! Please read the manual thoroughly before bringing this device into service. If the device was damaged in transit, do not install or use it and contact your dealer.

Features: easy panel mounting, large and clear display, low battery indication, high-grade ABS case, waterproof sensor wire (3m) and probe, on/off switch, °C/°F selection switch.

### 2. Specifications

Measuring Range	-50°C ~ +70°C / -58°F ~ +158°F
Accuracy	± 1°C / ± 1.8°F over full range
Resolution	0.1° between -19.9° ~ 70°, otherwise 1°
Sampling Time	5 seconds
Battery	1 x 1.5V type LR44 (incl.)
Ambient Temperature	-10°C ~ +50°C / +14°F ~ +122°F
Dimensions	52.5 x 27 x 14mm
Panel Cut-Out	51 x 25mm

### 3. Battery Replacement

Replace battery as soon as low-battery symbol is displayed. Turn left to open battery cover. Replace battery. Turn right to close battery cover.

For more info concerning this product, please visit our website [www.velleman.eu](http://www.velleman.eu).

The information in this manual is subject to change without prior notice.

## PMTEMP1 – DIGITALE THERMOMETERMODULE

### 1. Inleiding

Aan alle ingezetenen van de Europese Unie

Belangrijke milieu-informatie betreffende dit product



Dit symbool op het toestel of de verpakking geeft aan dat, als het na zijn levenscyclus wordt weggegooid, dit toestel schade kan toebrengen aan het milieu. Gooi dit toestel (en eventuele batterijen) niet bij het gewone huishoudelijke afval; het moet bij een gespecialiseerd bedrijf terechtkomen voor recycling. U moet dit toestel naar uw verdeler of naar een lokaal recyclagepunt brengen. Respecteer de plaatselijke milieuwetgeving. Hebt u vragen, contacteer dan de plaatselijke autoriteiten inzake verwijdering.

Dank u voor uw aankoop! Lees deze handleiding grondig voor u het toestel in gebruik neemt. Werd het toestel beschadigd tijdens het transport, installeer het dan niet en raadpleeg uw dealer.

Kenmerken: eenvoudige paneelmontage, groot en goed leesbaar display, aanduiding zwakke batterij, behuizing in hoogwaardig ABS, waterbestendige sensorkabel (3 m) en sensor, aan-uitschakelaar, keuzeschakelaar °C/°F.

### 2. Specificaties

Meetbereik	-50°C ~ +70°C / -58°F ~ +158°F
Nauwkeurigheid	± 1°C / ± 1.8°F over het gehele bereik
Resolutie	0,1° tussen -19,9° ~ 70°, anders 1°
Bemonsteringsfrequentie	5 seconden
Batterij	1 x 1,5 V type LR44 (meegelev.)
Omgevingstemperatuur	-10°C ~ +50°C / +14°F ~ +122°F
Afmetingen	52,5 x 27 x 14 mm
Inbouwafmetingen	51 x 25 mm

### 3. Batterij vervangen

Vervang batterij van zodra symbool voor zwakke batterij verschijnt. Draai naar links om batterijvak te openen. Vervang batterij. Draai links om batterijvak te sluiten.

Voor meer informatie omtrent dit product, zie [www.velleman.eu](http://www.velleman.eu).

De informatie in deze handleiding kan te allen tijde worden gewijzigd zonder voorafgaande kennisgeving.

## PMTEMP1 – MODULE THERMOMÈTRE NUMÉRIQUE

### 1. Introduction

Aux résidents de l'Union européenne

Des informations environnementales importantes concernant ce produit



Ce symbole sur l'appareil ou l'emballage indique que l'élimination d'un appareil en fin de vie peut polluer l'environnement. Ne pas jeter un appareil électrique ou électronique (et des piles éventuelles) parmi les déchets municipaux non sujets au tri sélectif; une déchèterie traitera l'appareil en question. Renvoyer les équipements usagés à votre fournisseur ou à un service de recyclage local. Il convient de respecter la réglementation locale relative à la protection de l'environnement. En cas de questions, contacter les autorités locales pour élimination.

Nous vous remercions de votre achat! Lire la présente notice attentivement avant la mise en service de l'appareil. Si l'appareil a été endommagé pendant le transport, ne pas l'installer et consulter votre revendeur.

Caractéristiques: montage facile, afficheur clairement lisible grand format, indication pile faible, boîtier en ABS haute qualité, câble (3 m) et capteur imperméables, interrupteur marche/arrêt, sélecteur °C/°F.

### 2. Spécifications

Plage de mesure	-50°C ~ +70°C / -58°F ~ +158°F
Précision	± 1°C / ± 1,8°F pleine échelle
Résolution	0,1° entre -19,9° ~ 70°, autrement 1°
Délai d'échantillonnage	5 secondes
Pile	1 pile 1,5 V type LR44 (incl.)
Température ambiante	-10°C ~ +50°C / +14°F ~ +122°F
Dimensions	52,5 x 27 x 14 mm
Dimensions encastrement	51 x 25 mm

### 3. Remplacement de la pile

Remplacer la pile dès l'affichage du symbole de pile faible. Tourner vers la gauche pour ouvrir le compartiment de la pile. Remplacer la pile. Tourner vers la droite pour fermer le compartiment de la pile.

Pour plus d'information concernant cet article, visitez notre site web [www.velleman.eu](http://www.velleman.eu).

Toutes les informations présentées dans cette notice peuvent être modifiées sans notification préalable.

## **GASÓMETRO**

### **SINTTA MECHANICAL STEEL CASE GAS METER**





Figura A-1. Gasómetro Sintta mechanical steel case gas meter

#### 产品结构 Product Structural Principles:

IC卡预付费智能燃气表是以钢壳膜式燃气表为基础，加装控制阀门、电控制部分及IC卡操作系统组成的智能型计量仪表。

IC card prepaid gas meter designed base steel case mechanical gas meter, included inside valve, electronic control module and IC card operation software system.

#### 功能特点 Product Characteristice:

预收费充值功 Prepaid funct

气量不足提示 Gas value lack notice func

透支功能 Overdraft function

数据保持和恢复功能 Data recording and restoration function

电源欠压预警及报警功能 Battery power low notice and warning function

断电保护功能 Power failure protection function

抗磁攻击功能 Magnet attack resistance function

气表流量限制功能 Flow rate limitation function

数据转移功能 Data transfer function

表存限量功能 Gas value hoarding resistance function

异常自行分析及提示功能 Status self-detect and notice function

主要技术参数 Main Parameter:

计量等级 Class b		B级
总压力损失 Total pressure loss (with inside valve)		Pmax<250Pa
电源及电压 Support power		4 x1.5V
工作电流 Working current		I≤30 μ A
数据保持时间 Data recording period		T≥10年
IC卡插拔次数 IC card using times		n1≥500次
阀门无故障工作次数 Uninterrupted operation time		n2≥20000次
使用环境 Operation condition	温度 Temperature	-10℃~40℃
	相对湿度 Relative humidity	95%
	环境压力 Pressure	86kPa~106kPa
适用气源介质 Suitable medium: Nature gas, manufactured gas, LPG and marsh gas		天然气 Nature Gas、石油液化气 LPG、人工煤气 Man-made Gas、沼气 Biogas

## ANEXO C – DATOS EXPERIMENTALES

### MEDICIÓN del 5 de DICIEMBRE de 2013, GLP

$T_{amb} = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla A-1. Datos de las mediciones del 5 de diciembre de 2013

Tiempo, t [min]	Temperaturas, [ $^{\circ}\text{C}$ ]													Volumen, V [ $\text{m}^3$ ]	Incremento de volumen, $\Delta V$ [ $\text{m}^3$ ]	Caudal, C [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	Caudal, C [l/h]
	$T_I^e$	$T_I^s$	$T_G^e$	$T_G^s$	$T_R^e$	$T_R^s$	$T_C^e$	$T_C^s$	$T_E^e$	$T_E^s$	$T_A^e$	$T_A^s$	$T_{cam}$				
0	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	19'6	10'9938	0	0'0168	16'8
5	22	23	23	22'5	22'5	22	22'5	23	22	22	22	21'5	19'6	10'9952	0'0014	0'0168	16'8
10	22'5	26	26	23'5	23'5	22	22'5	23	22	21'5	21'5	21'5	19'6	10'9962	0'0024	0'0120	12'0
15	22'5	30	30	25	25	22	21'5	22	22	21'5	21'5	21'5	19'6	10'9972	0'0034	0'0120	12'0
20	22'5	35'5	35'5	26'5	26'5	22	21'5	22'5	22	21'5	21'5	21'5	19'6	10'9982	0'0044	0'0120	12'0
25	23	44	44	30	30	22	22	23	22'5	21'5	21'5	21'5	19'6	10'9994	0'0056	0'0144	14'4
30	24'5	90'5	90'5	33'5	33'5	23	22'5	23	24	22	22'5	23'5	19'6	11'0004	0'0066	0'0120	12'0
35	26'5	81	81	47'5	47'5	44'5	23	23	25	22	22'5	23	19'6	11'0014	0'0076	0'0120	12'0
40	28	83	83	47	47	49	43'5	23'5	25	22'5	23	24'5	19'5	11'0024	0'0086	0'0120	12'0
45	29'5	84'5	84'5	46	46	51	42	26	26	22'5	23'5	24	19'4	11'0033	0'0095	0'0108	10'8
50	30'5	85	85	50'5	50'5	50	46	27'5	26	23	24	24'5	19'2	11'0044	0'0106	0'0132	13'2
55	33	81	81	48	48	51	46'5	27'5	27	23'5	25	26'5	18'8	11'0054	0'0116	0'0120	12'0
60	37	93	93	50'5	50'5	53	48	28'5	27'5	24	25'5	27	18'1	11'0064	0'0126	0'0120	12'0
65	31'5	84	84	50'5	50'5	52	44	28	27	24'5	25	26'5	17'3	11'0075	0'0137	0'0132	13'2
70	33	94	94	54	54	52	49'5	28	27'5	24'5	25'5	27'5	16'4	11'0085	0'0147	0'0120	12'0
75	34	95	95	55	55	53	48	29	28	25	26'5	27'5	15'6	11'0095	0'0157	0'0120	12'0
80	33'5	99'5	99'5	56	56	54	51	29	27'5	25'5	27	28	14'7	11'0105	0'0167	0'0120	12'0



85	33'5	98'5	98'5	54'5	54'5	54	47	29	26'5	26	28	28'5	13'8	11'0115	0'0177	0'0120	12'0
90	34	102'5	102'5	54	54	53	49'5	29	28	26'5	28'5	29'5	12'8	11'0126	0'0188	0'0132	13'2
95	34'5	99'5	99'5	54'5	54'5	53	50'5	30	28'5	27	29	30	11'8	11'0136	0'0198	0'0120	12'0
100	35	105	105	60'5	60'5	55	50	30	27'5	27'5	29'5	31	10'9	11'0146	0'0208	0'0120	12'0
105	37'5	103'5	103'5	61	61	53'5	48	30'5	29'5	28	30	32	10'0	11'0157	0'0219	0'0132	13'2
110	36'5	101	101	62	62	53'5	49'5	31	28	28'5	31	32	9'1	11'0167	0'0229	0'0120	12'0
115	37'5	106'5	106'5	65	65	54	51	31	28	28'5	30'5	33	8'2	11'0177	0'0239	0'0120	12'0
120	37	105'5	105'5	63	63	54'5	51'5	31'5	28'5	29'5	32	33	7'4	11'0187	0'0249	0'0120	12'0
125	37	104	104	65	65	53'5	51	31'5	28'5	29'5	32	33'5	6'6	11'0198	0'0260	0'0132	13'2
130	39'5	105'5	105'5	64	64	54'5	52'5	32	28'5	29'5	31'5	33'5	5'8	11'0207	0'0269	0'0108	10'8
135	40	106'5	106'5	62	62	54	51'5	31	28'5	30	32	34'5	5'0	11'0218	0'0280	0'0132	13'2
140	38'5	106'5	106'5	65'5	65'5	54'5	50'5	31'5	28'5	30	32'5	33'5	4'4	11'0228	0'0290	0'0120	12'0
145	38'5	104'5	104'5	64'5	64'5	55	51'5	32	29'5	30'5	32'5	34'5	3'7	11'0238	0'0300	0'0120	12'0
150	38	104	104	69'5	69'5	54	51	32	29'5	30'5	33	35'5	3'0	11'0249	0'0311	0'0132	13'2
155	38	106'5	106'5	78'5	78'5	54	50'5	32	29	30'5	32'5	35	2'3	11'0259	0'0321	0'0120	12'0
160	41	107'5	107'5	69'5	69'5	55	51'5	32'5	29'5	30'5	32'5	35	1'8	11'0269	0'0331	0'0120	12'0
165	38'5	105	105	69	69	54	51'5	31'5	30	30'5	33	35	1'1	11'0279	0'0341	0'0120	12'0
170	39'5	106	106	72	72	54	52	31'5	29	30'5	33	35'5	0'5	11'0290	0'0352	0'0132	13'2
175	39'5	107	107	73'5	73'5	55	52	32	29'5	31	33'5	35'5	0'0	11'0300	0'0362	0'0120	12'0
180	38	103	103	75'5	75'5	54'5	49'5	31'5	29	30'5	33	35'5	-0'6	11'0310	0'0372	0'0120	12'0
185	39	104'5	104'5	75'5	75'5	55'5	49'5	32'5	29'5	31	33'5	36	-1'0	11'0321	0'0383	0'0132	13'2
190	38'5	105	105	71	71	54	50'5	32	29	30'5	33	35'5	-1'5	11'0333	0'0395	0'0144	14'4
195	40'5	107	107	75'5	75'5	55	51'5	33	29'5	30'5	33	35'5	-1'8	11'0342	0'0404	0'0108	10'8
200	39'5	106'5	106'5	75'5	75'5	55	50'5	33	29'5	31	33'5	36	-2'2	11'0352	0'0414	0'0120	12'0
205	39'5	106	106	75	75	54'5	50'5	33	30'5	31	33'5	36'5	-2'7	11'0362	0'0424	0'0120	12'0
210	39'5	107	107	72	72	54'5	52	33'5	30'5	31	33'5	35'5	-3'1	11'0372	0'0434	0'0120	12'0



215	39'5	105'5	105'5	73'5	73'5	54	51	33	30	31	33'5	35'5	-3'5	11'0382	0'0444	0'0120	12'0
220	39'5	106'5	106'5	83	83	54	51	33	30	31'5	34	37	-3'9	11'0393	0'0455	0'0132	13'2
225	39'5	105'5	105'5	86	86	54'5	51'5	32'5	30'5	31	34	36'5	-4'2	11'0404	0'0466	0'0132	13'2
230	40'5	107	107	82'5	82'5	54'5	51'5	33	30'5	31'5	34	36	-4'5	11'0414	0'0476	0'0120	12'0
235	41	107	107	82'5	82'5	54'5	52	33	30'5	31'5	34	37	-4'8	11'0424	0'0486	0'0120	12'0
240	40'5	106	106	86'5	86'5	53'5	51	33'5	30'5	31'5	34	37	-4'7	11'0435	0'0497	0'0132	13'2
245	39'5	105'5	105'5	85'5	85'5	54	51	33	31	31'5	34	36	-5'1	11'0445	0'0507	0'0120	12'0
250	40	107	107	87'5	87'5	55	52	33	30'5	31'5	34	37	-5'4	11'0455	0'0517	0'0120	12'0
255	41	108'5	108'5	88'5	88'5	55'5	52	33'5	30'5	31'5	34	37	-5'7	11'0466	0'0528	0'0132	13'2
260	40'5	106'5	106'5	86'5	86'5	54	52	33	30	31	34	37	-5'8	11'0476	0'0538	0'0120	12'0
265	39'5	105	105	83	83	55	52	33	30'5	31'5	34	37	-6'0	11'0486	0'0548	0'0120	12'0
270	41	107	107	86	86	55	53	33	30'5	31'5	34'5	37	-6'3	11'0497	0'0559	0'0132	13'2
275	42	108	108	84'5	84'5	56	52'5	33'5	30'5	32	34'5	37'5	-6'5	11'0508	0'0570	0'0132	13'2
280	40	108'5	108'5	90	90	55	51'5	33	30'5	31	35'5	37	-6'7	11'0519	0'0581	0'0132	13'2
285	40'5	107	107	90	90	55'5	50'5	33'5	30'5	31'5	34'5	37'5	-6'8	11'0529	0'0591	0'0120	12'0
290	40'5	107'5	107'5	86'5	86'5	55	50'5	33'5	31	31'5	34'5	36'5	-7'0	11'0539	0'0601	0'0120	12'0
295	40'5	108'5	108'5	91	91	55	51	33'5	30'5	31'5	34'5	37	-7'1	11'0550	0'0612	0'0132	13'2
300	40	109	109	91'5	91'5	55	50	34	31	31'5	34'5	37'5	-7'3	11'0560	0'0622	0'0120	12'0
305	40'5	106'5	106'5	89	89	55	49'5	34	31'5	31'5	34'5	37'5	-7'5	11'0571	0'0633	0'0132	13'2
310	40'5	108'5	108'5	90	90	55	51'5	34	31'5	31'5	34'5	37'5	-7'6	11'0581	0'0643	0'0120	12'0
315	41	107	107	89'5	89'5	54'5	51'5	34	31	31'5	34'5	37'5	-7'8	11'0591	0'0653	0'0120	12'0
320	40'5	107'5	107'5	89	89	54'5	52'5	33'5	31	31'5	34'5	37'5	-7'9	11'0602	0'0664	0'0132	13'2
325	40'5	107	107	91'5	91'5	55	52	33'5	30'5	31'5	34'5	37'5	-8'0	11'0612	0'0674	0'0120	12'0
330	41'5	108'5	108'5	92'5	92'5	55	51'5	33'5	31	32	34'5	38	-8'1	11'0623	0'0685	0'0132	13'2
335	40	105'5	105'5	93	93	54	52	33'5	31	31'5	34'5	37	-8'1	11'0633	0'0695	0'0120	12'0
340	40	106	106	87	87	54	51'5	33	31	31'5	34'5	37'5	-8'2	11'0644	0'0706	0'0132	13'2

345	41	107	107	93	93	54'5	51'5	33	30	31	34'5	37'5	-8'4	11'0655	0'0717	0'0132	13'2
350	41	107	107	91	91	54'5	51'5	33	30'5	31'5	34'5	37	-8'5	11'0665	0'0727	0'0120	12'0
355	40'5	108	108	89	89	54'5	50'5	32'5	31'5	31	34	37'5	-8'6	11'0675	0'0737	0'0120	12'0
360	40'5	107	107	92'5	92'5	54'5	50'5	32'5	31	31	34'5	37'5	-8'6	11'0686	0'0748	0'0132	13'2
365	41	108'5	108'5	94'5	94'5	54'5	51'5	32'5	30'5	31'5	34'5	37'5	-8'6	11'0696	0'0758	0'0120	12'0
370	40'5	106'5	106'5	93	93	53'5	51'5	32'5	31	31	34'5	37'5	-8'6	11'0706	0'0768	0'0120	12'0

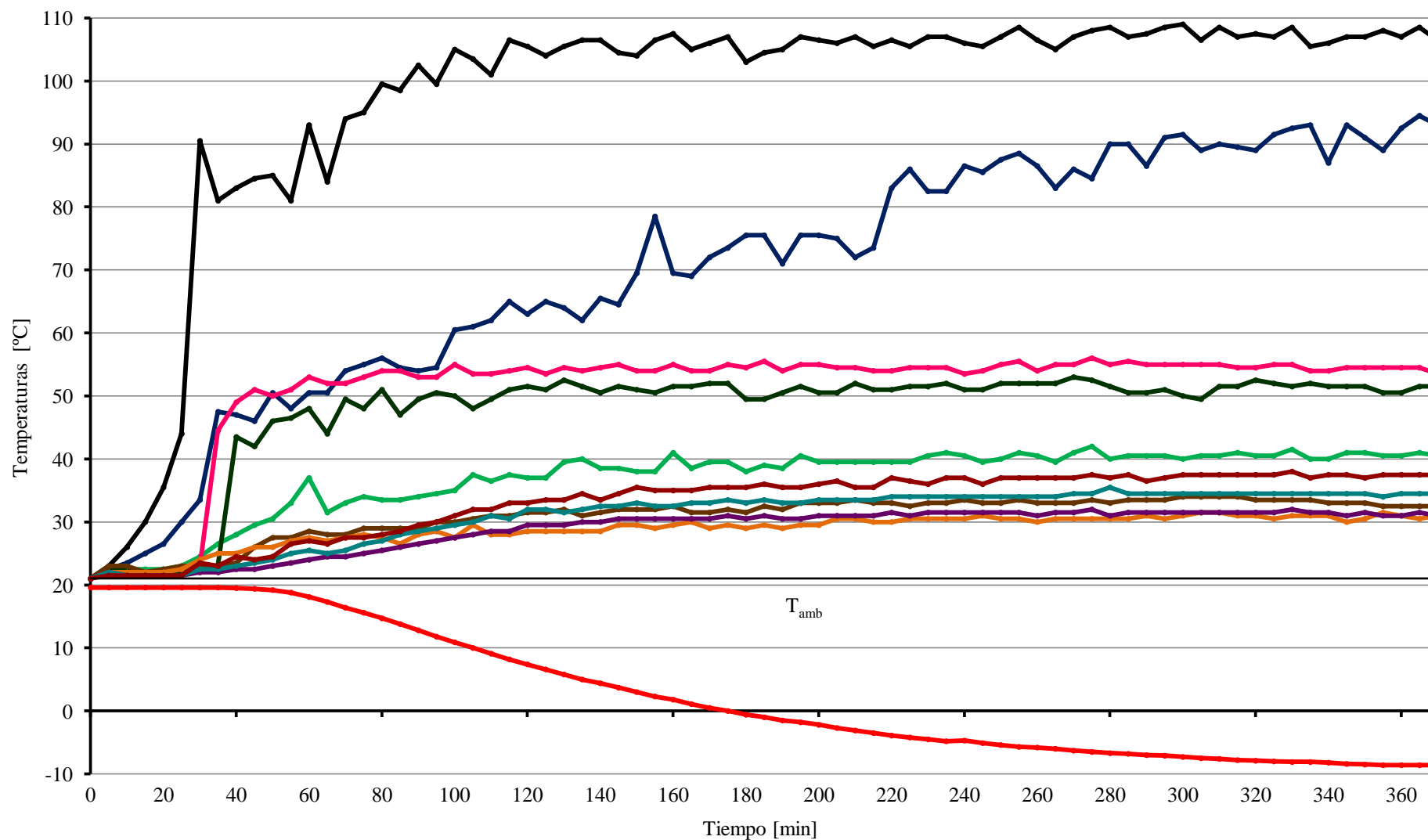


Gráfico A-1. Mediciones de temperaturas con GLP el 5 de diciembre de 2013

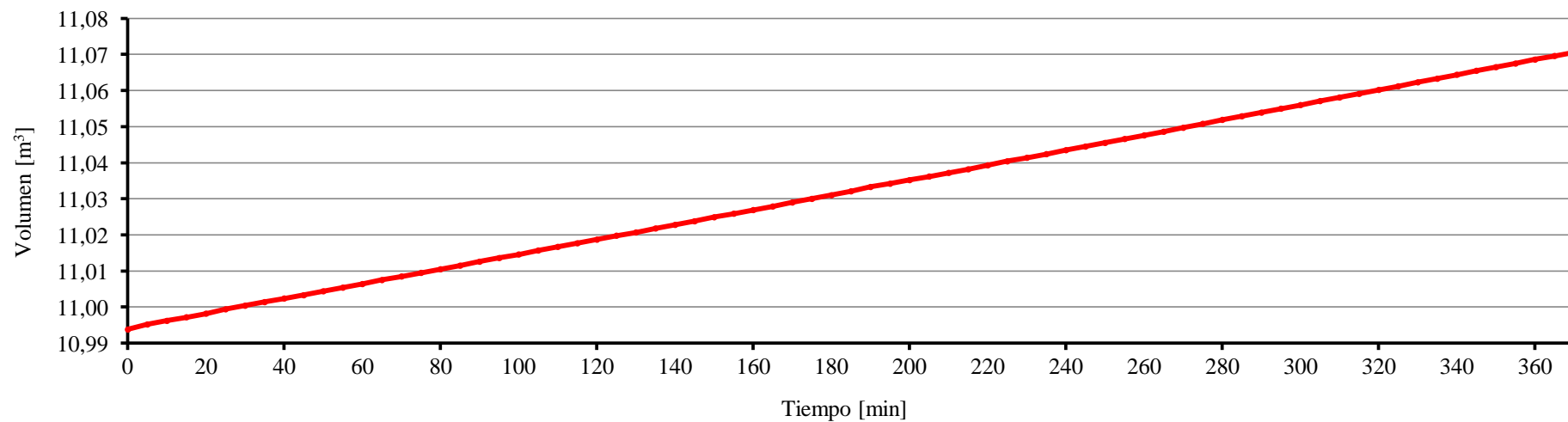


Gráfico A-2. Volumen de GLP consumido en la prueba del 5 de diciembre de 2013

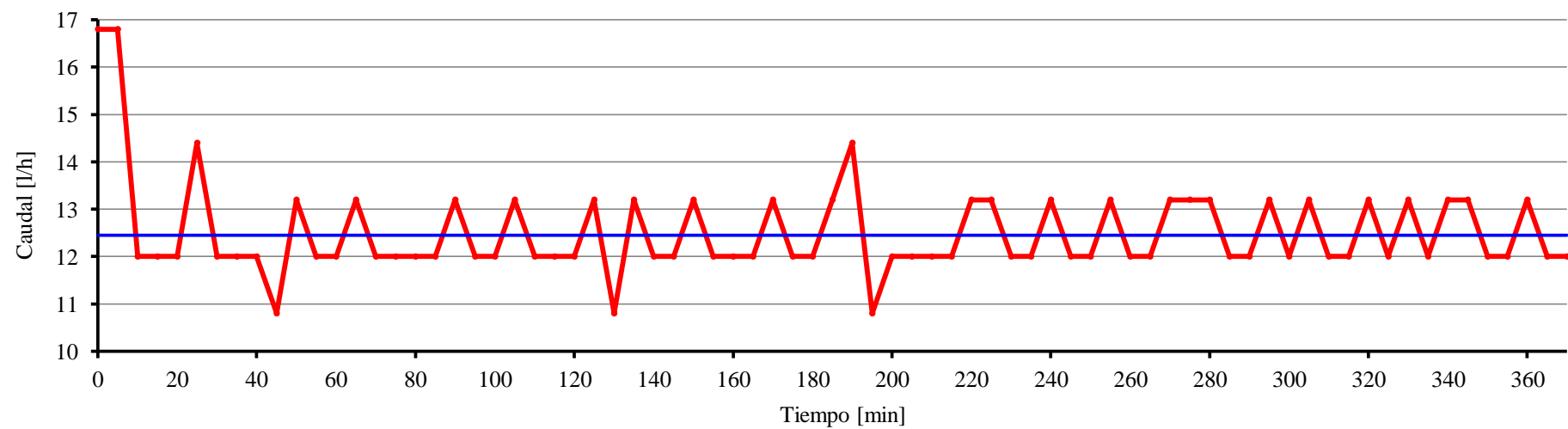


Gráfico A-3. Caudal de GLP circulante en la prueba del 5 de diciembre de 2013

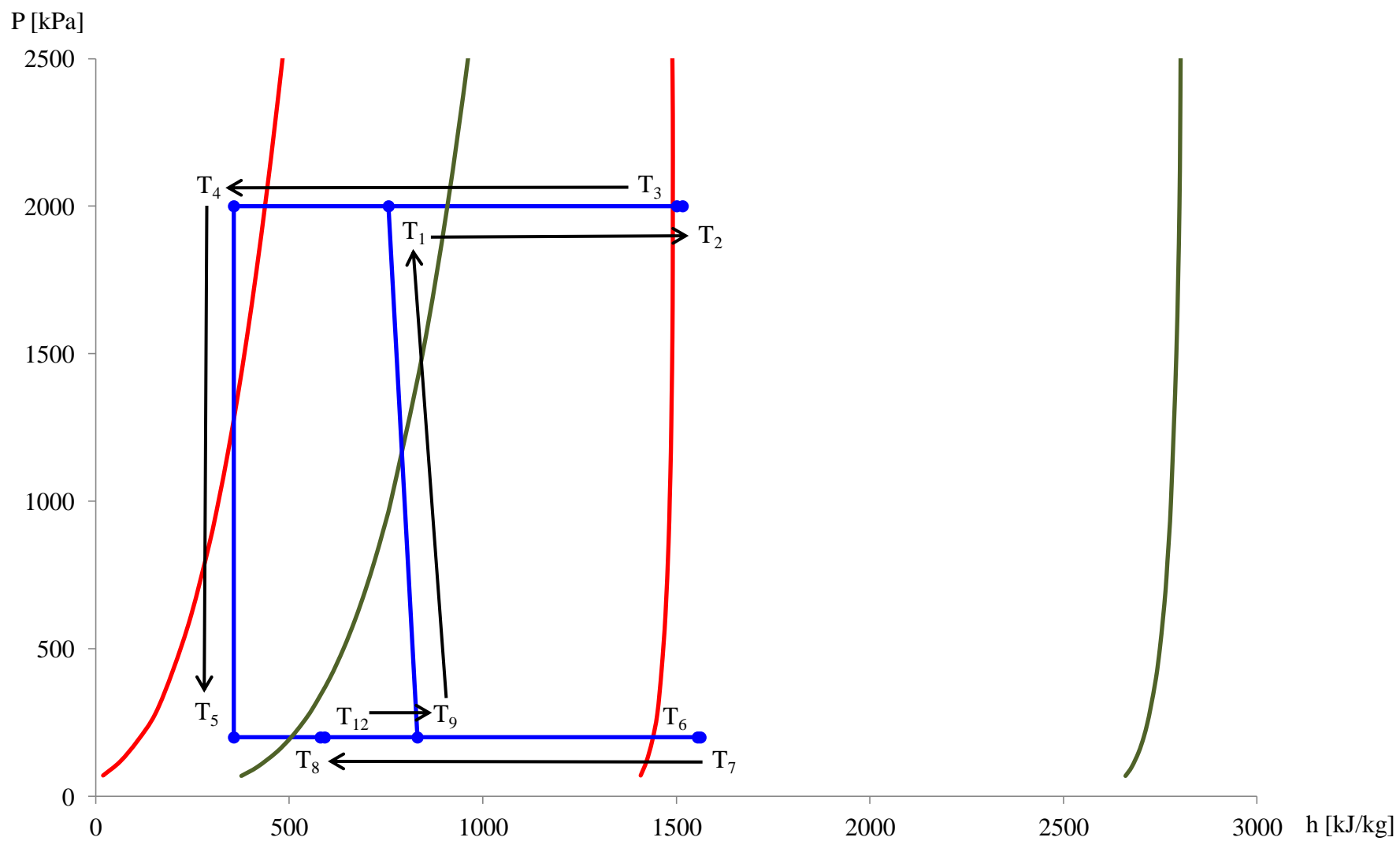


Gráfico A-4. Ciclo de refrigeración con GLP del 5 de diciembre de 2013

## MEDICIÓN del 6 de DICIEMBRE de 2013, biogás

$T_{amb} = 22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla A-2. Datos de las mediciones del 6 de diciembre de 2013

Tiempo, t	Temperaturas,													Volumen, V	Incremento de volumen, ΔV	Caudal, C	Caudal, C
	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>	T <sub>I</sub> <sup>s</sup>	T <sub>G</sub> <sup>e</sup>	T <sub>G</sub> <sup>s</sup>	T <sub>R</sub> <sup>e</sup>	T <sub>R</sub> <sup>s</sup>	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>	T <sub>I</sub> <sup>s</sup>	T <sub>G</sub> <sup>e</sup>	T <sub>G</sub> <sup>s</sup>	T <sub>R</sub> <sup>e</sup>	T <sub>A</sub> <sup>s</sup>	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>				
	[min]	[°C]															
0	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22'5	20'6	11'0753	0	0'0156	15'6
5	22'5	27	27	24	24	22	22	22'5	22'5	22	22'5	22	20'6	11'0766	0'0013	0'0156	15'6
10	22'5	28'5	28'5	24'5	24'5	22'5	22'5	22'5	22'5	22	22'5	22	20'6	11'0778	0'0025	0'0144	14'4
15	23	30'5	30'5	25'5	25'5	22'5	22'5	22'5	23	22'5	22'5	22	20'6	11'0792	0'0039	0'0168	16'8
20	23	32'5	32'5	26'5	26'5	23'5	22'5	24'5	23	22	22'5	22	20'6	11'0804	0'0051	0'0144	14'4
25	23'5	34	34	28	28	22'5	22'5	22'5	23	22'5	23	22'5	20'6	11'0818	0'0065	0'0168	16'8
30	23	34'5	34'5	29	29	22'5	22'5	22'5	23	22'5	22'5	22	20'6	11'0831	0'0078	0'0156	15'6
35	23'5	36	36	29'5	29'5	22'5	22'5	22'5	23'5	22'5	23	22'5	20'6	11'0844	0'0091	0'0156	15'6
40	24	37	37	30'5	30'5	23	22'5	23	23'5	22'5	23'5	22'5	20'6	11'0855	0'0102	0'0132	13'2
45	24	38	38	29'5	29'5	23	22'5	23	23'5	22'5	22'5	22'5	20'6	11'0870	0'0117	0'0180	18'0
50	24'5	38'5	38'5	31'5	31'5	23'5	23'5	23'5	24	23'5	23'5	23'5	20'6	11'0882	0'0129	0'0144	14'4
55	24'5	39	39	32	32	23'5	23	23	24	23	23	23	20'6	11'0895	0'0142	0'0156	15'6
60	24	39'5	39'5	31	31	23	22'5	23'5	24	22'5	22'5	22'5	20'6	11'0910	0'0157	0'0180	18'0
65	24'5	40'5	40'5	31	31	23'5	22'5	23'5	24'5	23	22'5	22'5	20'6	11'0924	0'0171	0'0168	16'8
70	24'5	40'5	40'5	32'5	32'5	23	22'5	22'5	24'5	22'5	22'5	22'5	20'6	11'0936	0'0183	0'0144	14'4
75	24'5	42	42	33	33	23	22'5	22'5	23'5	22'5	22'5	22'5	20'7	11'0950	0'0197	0'0168	16'8
80	24'5	41	41	33	33	23	23	23	25	23	23	23	20'7	11'0962	0'0209	0'0144	14'4
85	25	41'5	41'5	33	33	23'5	23	23'5	24	23	23	23	20'7	11'0976	0'0223	0'0168	16'8
90	24'5	41	41	33	33	23'5	22'5	23	24	23	23	23	20'7	11'0990	0'0237	0'0168	16'8

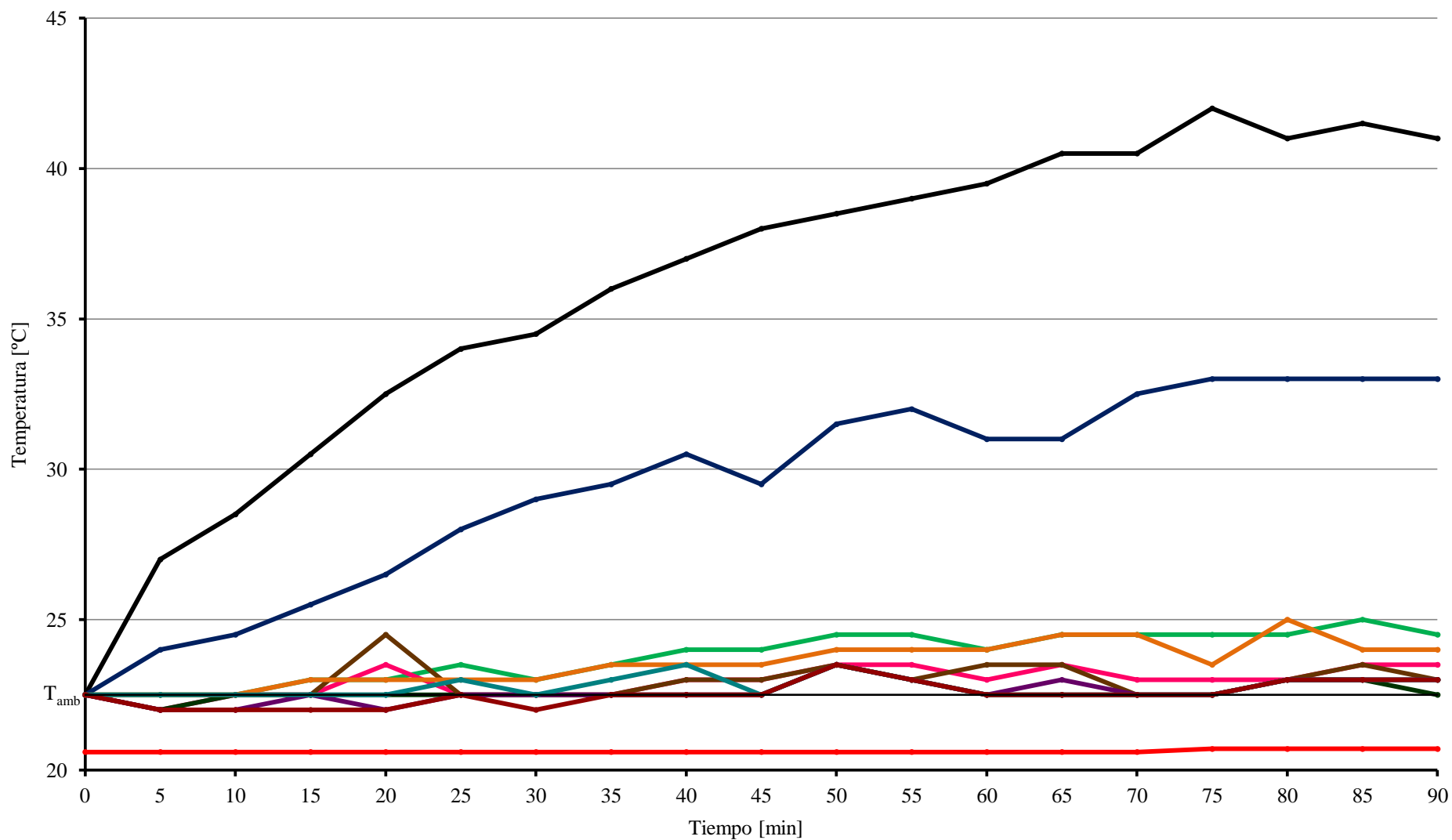


Gráfico A-5. Mediciones de temperaturas con biogás el 6 de diciembre de 2013

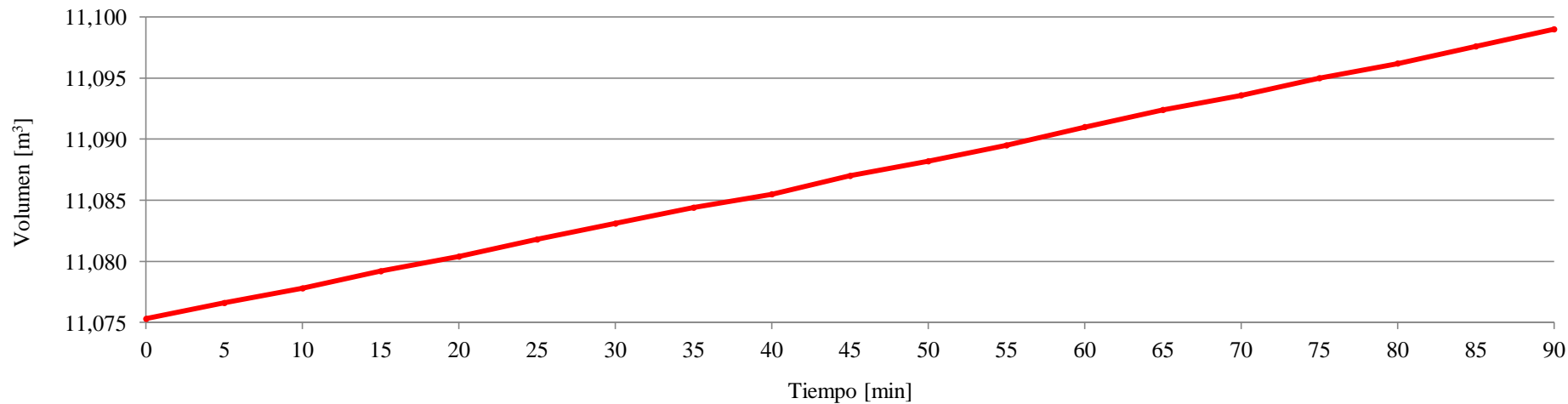


Gráfico A-6. Volumen de biogás consumido en la prueba del 6 de diciembre de 2013

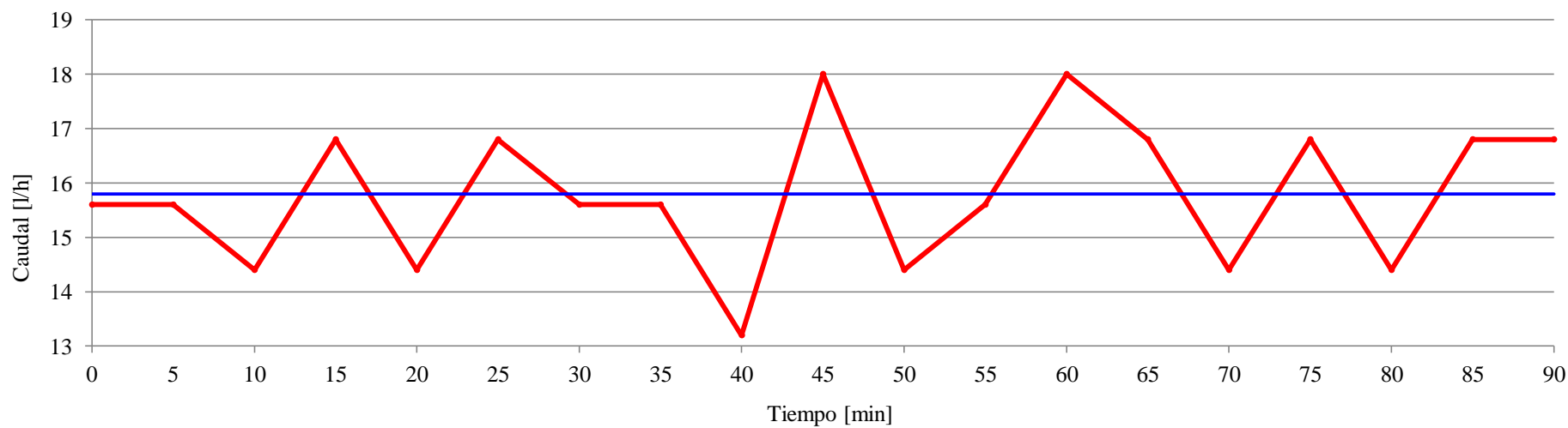


Gráfico A-7. Caudal de biogás circulante en la prueba del 6 de diciembre de 2013



## MEDICIÓN del 12 de DICIEMBRE de 2013, biogás

$T_{amb} = 18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla A-3. Datos de las mediciones del 12 de diciembre de 2013

Tiempo, t	Temperaturas,													Volumen, V	Incremento de volumen, ΔV	Caudal, C	Caudal, C
	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>	T <sub>I</sub> <sup>s</sup>	T <sub>G</sub> <sup>e</sup>	T <sub>G</sub> <sup>s</sup>	T <sub>R</sub> <sup>e</sup>	T <sub>R</sub> <sup>s</sup>	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>	T <sub>I</sub> <sup>s</sup>	T <sub>G</sub> <sup>e</sup>	T <sub>G</sub> <sup>s</sup>	T <sub>R</sub> <sup>e</sup>	T <sub>A</sub> <sup>s</sup>	T <sub>I</sub> <sup>e</sup>				
	[°C]																
[min]																	
0	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'5	18'1	11'1075	0	0'0876	87'6
5	22'5	24	24	21'5	21'5	19'5	19'5	19'5	22	19	19'5	19	17'8	11'1148	0'0073	0'0876	87'6
10	23'5	26	26	21'5	21'5	19	19	19	21'5	18'5	19	19	17'5	11'1270	0'0195	0'1464	146'4
15	24'5	34	34	23	23	19	18'5	19	22	18'5	19	19'5	17'4	11'1384	0'0309	0'1368	136'8
20	27	80'5	80'5	46'5	46'5	19	19	19	22	19	20	20'5	17'4	11'1502	0'0427	0'1416	141'6
25	29'5	89'5	89'5	48'5	48'5	51'5	45	20'5	23'5	19'5	21	22'5	17'4	11'1613	0'0538	0'1332	133'2
30	32	105	105	49	49	51'5	45'5	22'5	23'5	20	22'5	25	17'3	11'1724	0'0649	0'1332	133'2
35	33'5	110'5	110'5	51'5	51'5	53'5	48'5	25	23'5	21	23'5	26	17'0	11'1832	0'0757	0'1296	129'6
40	34'5	109	109	58'5	58'5	54	51	26	24'5	22	24'5	26'5	16'1	11'1923	0'0848	0'1092	109'2
45	35	107'5	107'5	99'5	99'5	55	48'5	26'5	25'5	22'5	25	27'5	14'5	11'2027	0'0952	0'1248	124'8
50	36'5	116	116	123'5	123'5	57	48'5	27	26'5	23'5	26'5	28'5	12'5	11'2130	0'1055	0'1236	123'6
55	37'5	119'5	119'5	128	128	58	47'5	27'5	26'5	24'5	28	30'5	10'5	11'2230	0'1155	0'1200	120'0
60	38'5	119'5	119'5	120	120	57'5	50	27'5	27	25'5	29	32	8'6	11'2321	0'1246	0'1092	109'2
65	41	117'5	117'5	117	117	57	50'5	28	27'5	26'5	30'5	33'5	6'8	11'2414	0'1339	0'1116	111'6
70	40'5	120	120	121'5	121'5	54'5	50	28'5	27	27	31'5	35	5'2	11'2503	0'1428	0'1068	106'8
75	43	117	117	116	116	56'5	51'5	28	27'5	28	32	36'5	3'4	11'2590	0'1515	0'1044	104'4
80	43	117	117	100'5	100'5	55'5	47'5	27'5	27	28	32	35'5	2'1	11'2674	0'1599	0'1008	100'8
85	42'5	115'5	115'5	93	93	55	48	27'5	27'5	28'5	32	36	1'0	11'2734	0'1659	0'0720	72'0
90	42'5	117	117	74'5	74'5	54'5	49	27'5	27'5	28'5	32	34	0'2	11'2832	0'1757	0'1176	117'6

95	42	114'5	114'5	111	111	55'5	47	28'5	27'5	28'5	32	37'5	-0'5	11'2934	0'1859	0'1224	122'4
100	42'5	116'5	116'5	115	115	57'5	48	28	28'5	28'5	32'5	34	-1'4	11'3038	0'1963	0'1248	124'8
105	43'5	120'5	120'5	118'5	118'5	58'5	50	29	28'5	29	33	36'5	-2'4	11'3134	0'2059	0'1152	115'2
110	43	119	119	119	119	59	49'5	29	28'5	29	33	38	-3'1	11'3232	0'2157	0'1176	117'6
115	43'5	117'5	117'5	127'5	127'5	58	51	29'5	28'5	29	33'5	38'5	-4'0	11'3320	0'2245	0'1056	105'6
120	42'5	117'5	117'5	123'5	123'5	57	46	28'5	28'5	29	33	36'5	-4'7	11'3403	0'2328	0'0996	99'6
125	42'5	116'5	116'5	110	110	56	49'5	28'5	28'5	28	33	36'5	-5'4	11'3483	0'2408	0'0960	96'0
130	43'5	117'5	117'5	108'5	108'5	55	49	29	28'5	28'5	33	37	-6'0	11'3563	0'2488	0'0960	96'0
135	44	113'5	113'5	75	75	54'5	50	29	28	28	33	36'5	-6'7	11'3634	0'2559	0'0852	85'2
140	44	117	117	117'5	117'5	56	47'5	28'5	28'5	28	33'5	36'5	-7'1	11'3748	0'2673	0'1368	136'8
145	43'5	114'5	114'5	105'5	105'5	58	48'5	29'5	28'5	28'5	33'5	37'5	-7'5	11'3855	0'2780	0'1284	128'4
150	44'5	117	117	117'5	117'5	59'5	48'5	29	28'5	27	34	36'5	-8'0	11'3954	0'2879	0'1188	118'8
155	45	117'5	117'5	129	129	59	50	29'5	29	26'5	33'5	38	-8'4	11'4042	0'2967	0'1056	105'6
160	43	117	117	121'5	121'5	57	49'5	30'5	29'5	26'5	33'5	35	-9'0	11'4119	0'3044	0'0924	92'4
165	43'5	110'5	110'5	88'5	88'5	54'5	49	29	28'5	26'5	33	37	-9'5	11'4183	0'3108	0'0768	76'8
170	42'5	110'5	110'5	57	57	54	46'5	28'5	28'5	27	32'5	36'5	-10'0	11'4242	0'3167	0'0708	70'8
175	41	102	102	49'5	49'5	53'5	37	27'5	28	27'5	32	37'5	-10'2	11'4284	0'3209	0'0504	50'4
180	39	88'5	88'5	48'5	48'5	53'5	30'5	26	27	27	29'5	36	-10'0	11'4313	0'3238	0'0348	34'8
183'37"	37	76'5	76'5	50	50	53	28'5	25'5	26	27	29'5	35'5	-9'5	11'4324	0'3249	0'0132	13'2

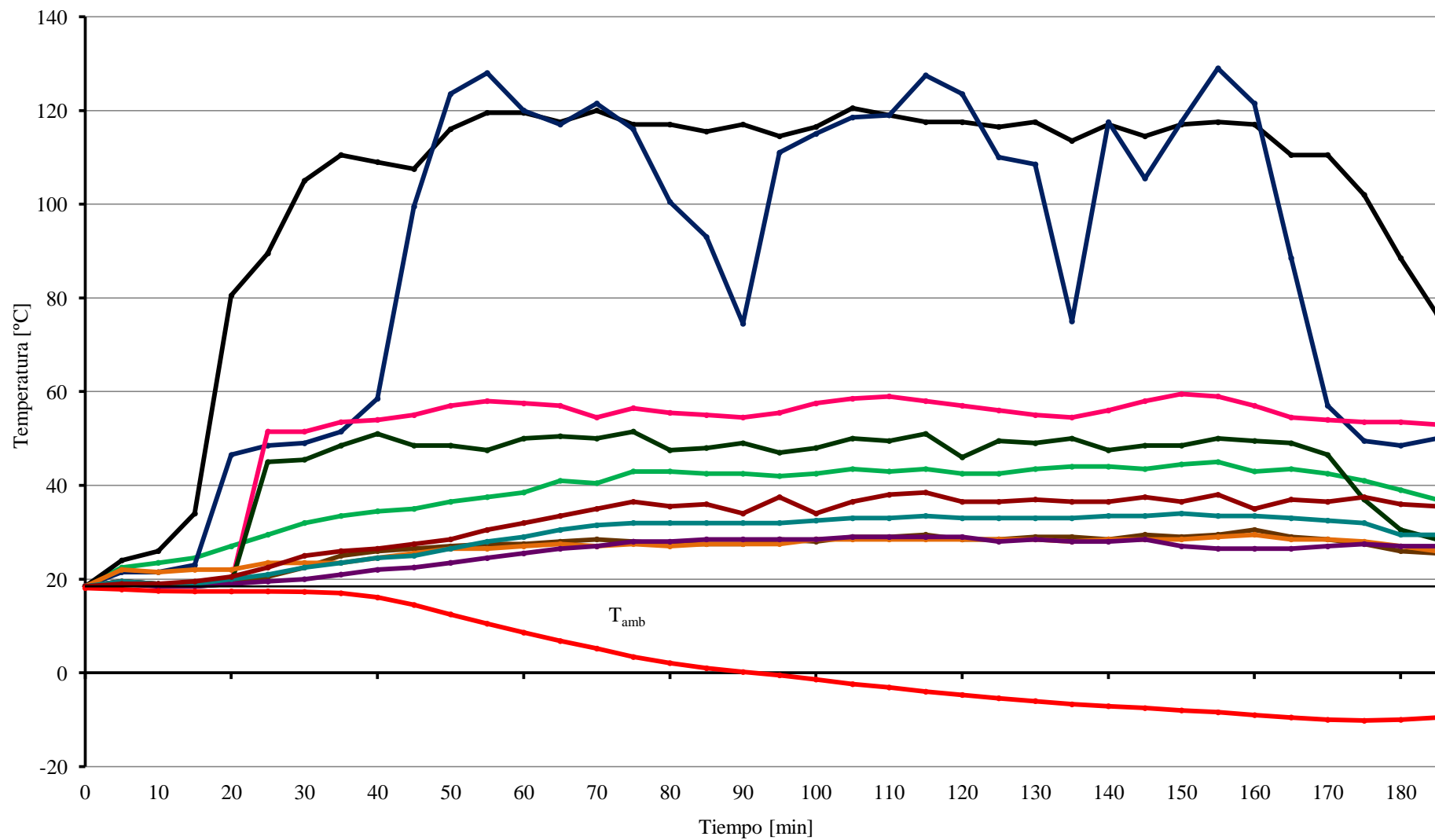


Gráfico A-8. Mediciones de temperaturas con biogás el 12 de diciembre de 2013

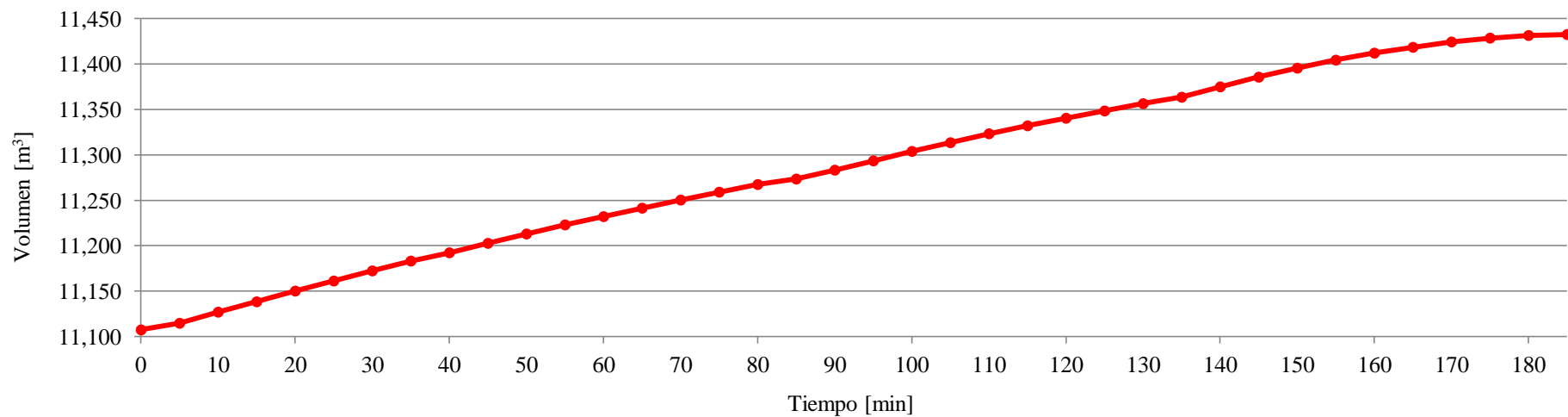


Gráfico A-9. Volumen de biogás consumido en la prueba del 12 de diciembre de 2013

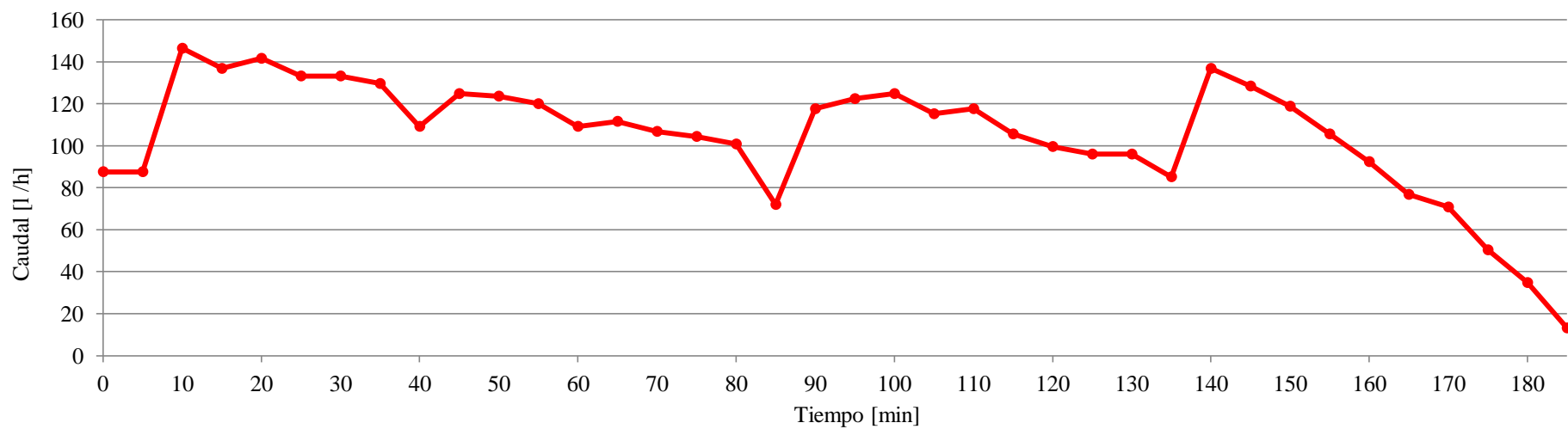


Gráfico A-10. Caudal de biogás circulante en la prueba del 12 de diciembre de 2013

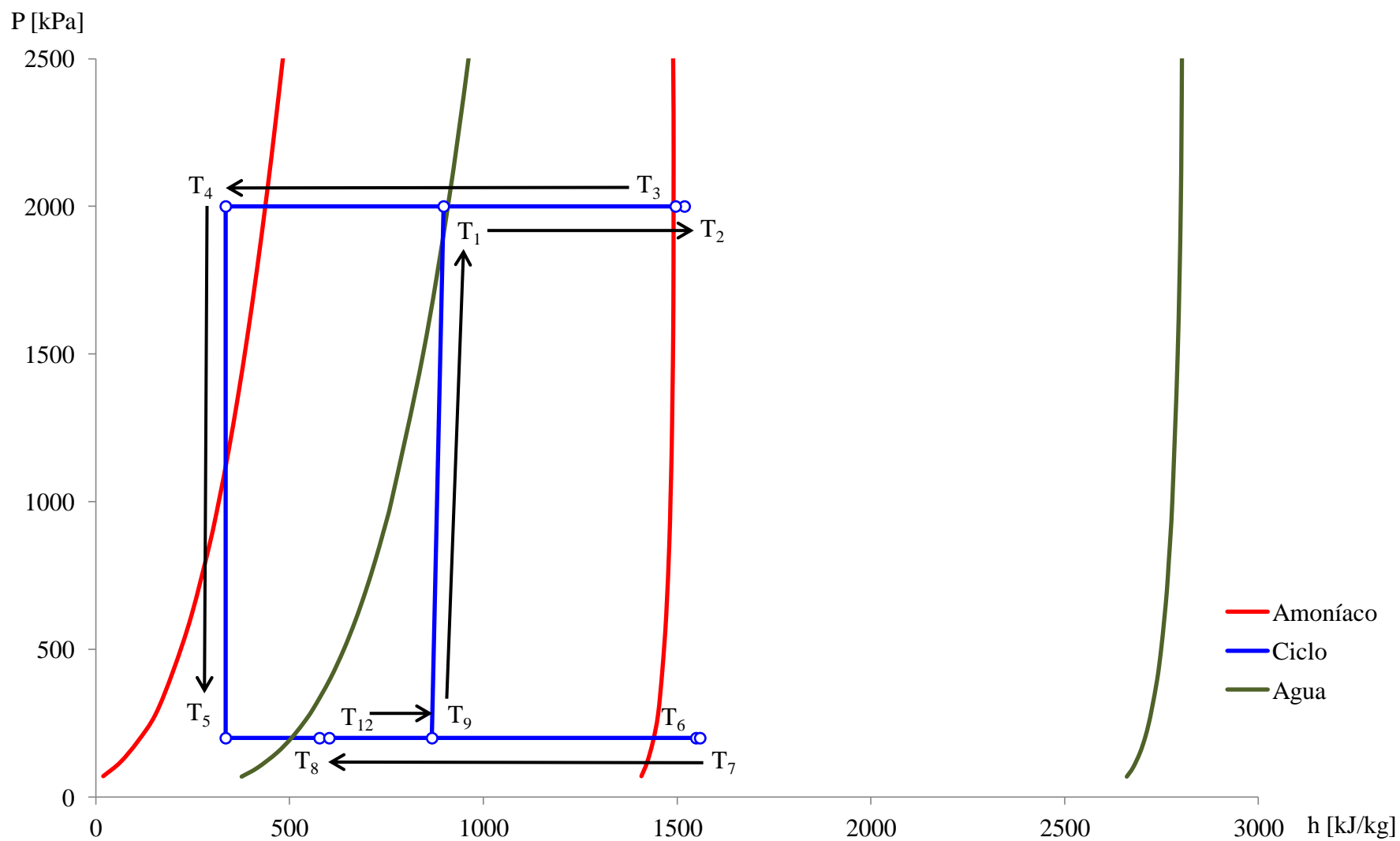


Gráfico A-11. Ciclo de refrigeración con biogás del 12 de diciembre de 2013

## ANEXO D – PROPIEDADES TERMODINÁMICAS

### AGUA

Tabla A-4. Propiedades termodinámicas de agua saturada

Temp., T	Presión de saturación, P	Densidad, $\rho$		Entalpía de vaporización, $h_{fg}$	Calor específico, $C_p$		Conductividad térmica, k		Viscosidad dinámica, $\mu$		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, $\beta$
[°C]	[kPa]	[kg/m <sup>3</sup> ]		[kJ/kg]	[J/kg·K]		[W/m·K]		[Pa·s]				[1/K]
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido
10	1'228	999'7	0'0094	2478	4194	1862	0'580	0'0176	1307	9'46	9'45	1	7'33E-4
15	1'705	999'1	0'0128	2466	4186	1863	0'589	0'0179	1138	9'59	8'09	1	1'38E-4
20	2'339	998'0	0'0173	2454	4182	1867	0'598	0'0182	1002	9'73	7'01	1	1'95E-4
25	3'169	997'0	0'0231	2442	4180	1870	0'607	0'0186	891	9'87	6'14	1	2'47E-4
30	4'246	996'0	0'0304	2431	4178	1875	0'615	0'0189	798	10'01	5'42	1	2'94E-4
35	5'628	994'0	0'0397	2419	4178	1880	0'623	0'0192	720	10'16	4'83	1	3'37E-4
40	7'384	992'1	0'0512	2407	4179	1885	0'631	0'0196	653	10'31	4'32	1	3'77E-4
45	9'593	990'1	0'0655	2395	4180	1892	0'637	0'0200	596	10'46	3'91	1	4'15E-4
50	12'35	988'1	0'0831	2383	4181	1900	0'644	0'0204	547	10'62	3'55	1	4'51E-4
55	15'76	985'2	0'1045	2371	4183	1908	0'649	0'0208	504	10'77	3'25	1	4'84E-4
60	19'94	983'3	0'1304	2359	4185	1916	0'654	0'0212	467	10'93	2'99	1	5'17E-4
65	25'03	980'4	0'1614	2346	4187	1926	0'659	0'0216	433	11'10	2'75	1	5'48E-4
70	31'19	977'5	0'1983	2334	4190	1936	0'663	0'0221	404	11'26	2'55	1	6'07E-4
75	38'58	974'7	0'2421	2321	4193	1948	0'667	0'0225	378	11'42	2'38	1	6'53E-4
80	47'39	971'8	0'2935	2309	4197	1962	0'670	0'0230	355	11'59	2'22	1	6'70E-4
85	57'83	968'1	0'3536	2296	4201	1977	0'673	0'0235	333	11'76	2'08	1	7'02E-4
90	70'14	965'3	0'4235	2283	4206	1993	0'675	0'0240	315	11'93	1'96	1	7'16E-4

95	84'55	961'5	0'5045	2270	4212	2010	0'677	0'0246	297	12'10	1'85	1	7'50E-4
100	101'3	957'9	0'5978	2257	4217	2029	0'679	0'0251	282	12'27	1'75	1	7'98E-4
110	143'3	950'6	0'8263	2230	4229	2071	0'682	0'0262	255	12'61	1'58	1	8'58E-4
120	198'5	943'4	1'121	2203	4244	2120	0'683	0'0275	232	12'96	1'44	1	9'13E-4
130	270'1	934'6	1'496	2174	4263	2177	0'684	0'0288	213	13'30	1'33	1'01	9'70E-4
140	361'3	921'7	1'965	2145	4286	2244	0'683	0'0301	197	13'65	1'24	1'02	1'03E-3
150	475'8	916'6	2'546	2114	4311	2314	0'682	0'0316	183	13'99	1'16	1'02	1'15E-3
160	617'8	907'4	3'256	2083	4340	2420	0'680	0'0331	170	14'34	1'09	1'05	1'78E-3
180	1002	887'3	5'153	2015	4410	2590	0'673	0'0364	150	15'02	0'983	1'07	1'28E-3
200	1554	864'3	7'852	1941	4500	2840	0'663	0'0401	134	15'71	0'910	1'11	1'52E-3
300	8581	713'8	46'15	1405	5750	5980	0'548	0'0695	86	19'65	0'901	1'69	-
374'14	22090	317'0	317'0	0	∞	∞	∞	∞	43	43'13	-	-	-

Tabla A-5. Entalpía de agua sobrecalentada

t [°C]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
P [kPa]	h [kJ/kg]													
100	2676	2696	2716	2736	2756	2776	2796	2816	2835	2855	2875	2895	2914	2934
200				2727	2748	2769	2789	2809	2830	2850	2870	2890	2910	2930
300					2739	2761	2782	2803	2824	2845	2865	2886	2906	2924
400						2753	2775	2797	2818	2839	2860	2881	2902	2922
500							2767	2790	2812	2833	2855	2876	2897	2918
600							2759	2783	2805	2828	2850	2871	2893	2914
700								2775	2799	2822	2844	2867	2888	2910
800									2792	2816	2839	2861	2884	2906
900									2785	2809	2833	2856	2879	2902
1000									2778	2803	2827	2851	2874	2897
1100										2796	2821	2846	2869	2893
1200										2790	2815	2840	2865	2888
1300											2809	2835	2859	2884
1400											2803	2829	2854	2879
1500											2796	2823	2849	2874
1600												2817	2844	2869
1700												2811	2838	2864
1800												2805	2833	2859
1900												2798	2827	2854
2000													2821	2849
2100													2815	2844
2200													2809	2838
2300													2802	2832



2400

2827

2500

2821

Tabla A-6. Entalpía de agua subenfriada

t [°C]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
P [kPa]	h [kJ/kg]																			
100	42'12	83'96	125'8	167'6	209'4	251'3	293'1	335'0	377'0											
200	42'22	84'06	125'9	167'7	209'5	251'3	293'2	335'1	377'1	419'2	461'4	503'8								
300	42'31	84'15	126'0	167'8	209'6	251'4	293'3	335'2	377'1	419'2	461'5	503'9	546'5							
400	42'41	84'24	126'1	167'9	209'7	251'5	293'3	335'2	377'2	419'3	461'6	504'0	546'5	589'3						
500	42'51	84'34	126'2	168'0	209'8	251'6	293'4	335'3	377'3	419'4	461'6	504'0	546'6	589'4	632'4					
600	42'61	84'43	126'2	168'1	209'9	251'7	293'5	335'4	377'4	419'5	461'7	504'1	546'7	589'4	632'4					
700	42'70	84'53	126'3	168'2	210'0	251'8	293'6	335'5	377'5	419'5	461'8	504'2	546'7	589'5	632'5	675'7				
800	42'80	84'62	126'4	168'2	210'0	251'8	293'7	335'6	377'5	419'6	461'9	504'2	546'8	589'6	632'6	675'8	719'3			
900	42'90	84'71	126'5	168'3	210'1	251'9	293'8	335'6	377'6	419'7	461'9	504'3	546'9	589'6	632'6	675'9	719'4			
1000	43'00	84'81	126'6	168'4	210'2	252'0	293'8	335'7	377'7	419'8	462'0	504'4	546'9	589'7	632'7	675'9	719'4			
1100	43'09	84'90	126'7	168'5	210'3	252'1	293'9	335'8	377'8	419'8	462'1	504'4	547'0	589'8	632'7	676'0	719'5	763'3		
1200	43'19	85'00	126'8	168'6	210'4	252'2	294'0	335'9	377'8	419'9	462'1	504'4	547'1	589'7	632'8	676'0	719'5	763'4		
1300	43'29	85'09	126'9	168'7	210'5	252'3	294'1	336'0	377'9	420'0	462'2	504'5	547'1	589'9	632'9	676'1	719'6	763'4	807'7	
1400	43'39	85'18	127'0	168'8	210'6	252'3	294'2	336'0	378'0	420'1	462'3	504'7	547'2	590'0	632'9	676'1	719'6	763'5	807'7	
1500	43'48	85'28	127'1	168'9	210'6	252'4	294'2	336'1	378'1	420'1	462'4	504'7	547'3	590'0	633'0	676'2	719'7	763'5	807'7	
1600	43'58	85'37	127'2	168'9	210'7	252'5	294'3	336'2	378'2	420'2	462'4	504'8	547'3	590'1	633'0	676'3	719'8	763'6	807'8	852'4
1700	43'68	85'47	127'3	169'0	210'8	252'6	294'4	336'3	378'2	420'3	462'5	504'9	547'4	590'1	633'1	676'3	719'8	763'6	807'8	852'5
1800	43'78	85'57	127'3	169'1	210'9	252'7	294'5	336'4	378'3	420'4	462'6	504'9	547'5	590'2	633'2	676'4	719'9	763'7	807'9	852'5
1900	43'87	85'65	127'4	169'2	211'0	252'8	294'6	336'4	378'4	420'5	462'7	505'0	547'5	590'3	633'2	676'4	719'9	763'7	807'9	852'6
2000	43'97	85'75	127'5	169'3	211'1	252'9	294'7	366'5	378'5	420'5	462'7	505'1	547'6	590'3	633'3	676'5	720'0	763'8	808'0	852'6
2100	44'07	85'84	127'6	169'4	211'2	252'9	294'7	366'6	378'5	420'6	462'8	505'2	547'7	590'4	633'4	676'6	720'0	763'8	808'0	852'6
2200	44'16	85'93	127'7	169'5	211'2	253'0	294'8	336'7	378'6	420'7	462'9	505'2	547'7	590'5	633'4	676'6	720'1	763'9	808'1	852'7
2300	44'26	86'03	127'8	169'6	211'3	253'1	294'9	336'8	378'7	420'8	462'9	505'3	547'8	590'5	633'5	676'7	720'1	763'9	808'1	852'7

2400	44'36	86'12	127'9	169'7	211'4	253'2	295'0	336'8	378'8	420'8	463'0	505'4	547'9	590'6	633'5	676'7	720'2	764'0	808'2	852'8
2500	44'46	86'22	128'0	169'7	211'5	253'3	295'1	336'9	378'9	420'9	463'1	505'4	548'0	590'7	633'6	676'8	720'3	764'0	808'2	852'8

## AIRE

Tabla A-7. Propiedades del aire a distintas altitudes

Altitud, h [m]	Temperatura, T [°C]	Presión, P [kPa]	Gravedad, g [m/s <sup>2</sup> ]	Velocidad del sonido, V <sub>s</sub> [m/s]	Densidad, ρ [kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad, μ [Pa·s]	Conductividad térmica, k [W/m·K]
0	15'0	101'33	9'807	340'3	1'225	17'89	0'0253
200	13'7	98'95	9'806	339'5	1'202	17'83	0'0252
400	12'4	96'61	9'805	338'8	1'179	17'77	0'0252
600	11'1	94'32	9'805	338'0	1'156	17'71	0'0251
800	9'8	92'08	9'804	337'2	1'134	17'64	0'0250
1000	8'5	87'88	9'804	336'4	1'112	17'58	0'0249
1200	7'2	87'72	9'803	335'7	1'090	17'52	0'0248
1400	5'9	85'60	9'802	334'9	1'069	17'45	0'0247
1600	4'6	83'53	9'802	334'1	1'048	17'39	0'0245
1800	3'3	81'49	9'801	333'3	1'027	17'32	0'0244
2000	2'0	79'50	9'800	332'5	1'007	17'26	0'0243
2200	0'7	77'55	9'800	331'7	0'987	17'20	0'0242
2400	-0'59	75'63	9'799	331'0	0'967	17'13	0'0241
2600	-1'89	73'76	9'799	330'2	0'947	17'07	0'0240
2800	-3'19	71'92	9'798	329'4	0'928	17'00	0'0239
3000	-4'49	70'12	9'797	328'6	0'909	16'94	0'0238
3200	-5'79	68'36	9'797	327'8	0'891	16'87	0'0237
3400	-7'09	66'63	9'796	327'0	0'872	16'81	0'0236
3600	-8'39	64'94	9'796	326'2	0'854	16'74	0'0235
3800	-9'69	63'28	9'795	325'4	0'837	16'68	0'0234
4000	-10'98	61'66	9'794	324'6	0'819	16'61	0'0233
4200	-12'30	60'07	9'794	323'8	0'802	16'55	0'0232

4400	-13'6	58'52	9'793	323'0	0'785	16'48	0'0231
4600	-14'9	57'00	9'793	322'2	0'769	16'42	0'0230
4800	-16'2	55'51	9'792	321'4	0'752	16'35	0'0229
5000	-17'5	54'05	9'791	320'5	0'736	16'28	0'0228
5200	-18'8	52'62	9'791	319'7	0'721	16'22	0'0227
5400	-20'1	51'23	9'790	318'9	0'705	16'15	0'0226
5600	-21'4	49'86	9'789	318'1	0'690	16'08	0'0224
5800	-22'7	48'52	9'789	317'3	0'675	16'02	0'0223
6000	-24'0	47'22	9'788	316'5	0'660	15'95	0'0222
7000	-30'5	41'11	9'785	312'3	0'590	15'61	0'0217
8000	-36'9	35'65	9'782	308'1	0'526	15'27	0'0212
9000	-43'4	30'80	9'779	303'8	0'467	14'93	0'0206
10000	-49'9	26'50	9'776	299'5	0'414	14'58	0'0201

Tabla A-8. Propiedades termodinámicas del aire a 1 atm de presión

Temp., T [°C]	Densidad, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico, $C_p$ [J/kg·K]	Conductividad térmica, k [W/m·K]	Difusividad térmica, $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	Viscosidad dinámica, $\mu$ [Pa·s]	Viscosidad cinemática, $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	Número de Prandtl, Pr	Coefficiente de expansión volumétrica, $\beta$ [1/K]
-100	2'038	966	0'01582	8'036E-6	11'89	5'837E-6	0'7263	5'775E-3
-50	1'582	999	0'01979	1'252E-5	14'74	9'319E-6	0'7440	4'481E-3
-40	1'514	1002	0'02057	1'356E-5	15'27	1'008E-5	0'7436	4'289E-3
-30	1'451	1004	0'02134	1'465E-5	15'79	1'087E-5	0'7425	4'113E-3
-20	1'394	1005	0'02211	1'578E-5	16'30	1'169E-5	0'7408	3'950E-3
-10	1'341	1006	0'02288	1'696E-5	16'80	1'252E-5	0'7387	3'800E-3
0	1'292	1006	0'02364	1'818E-5	17'29	1'338E-5	0'7362	3'661E-3
5	1'269	1006	0'02401	1'880E-5	17'54	1'382E-5	0'7350	3'595E-3
10	1'246	1006	0'02439	1'944E-5	17'78	1'426E-5	0'7336	3'532E-3
15	1'225	1007	0'02476	2'009E-5	18'02	1'470E-5	0'7323	3'470E-3
20	1'204	1007	0'02514	2'074E-5	18'25	1'516E-5	0'7309	3'411E-3
25	1'184	1007	0'02551	2'141E-5	18'49	1'562E-5	0'7296	3'354E-3
30	1'164	1007	0'02588	2'208E-5	18'72	1'608E-5	0'7282	3'299E-3
35	1'145	1007	0'02625	2'277E-5	18'95	1'655E-5	0'7268	3'245E-3
40	1'127	1007	0'02662	2'346E-5	19'18	1'702E-5	0'7255	3'193E-3
45	1'109	1007	0'02699	2'416E-5	19'41	1'750E-5	0'7241	3'143E-3
50	1'092	1007	0'02735	2'487E-5	19'63	1'798E-5	0'7228	3'095E-3
60	1'059	1007	0'02808	2'632E-5	20'08	1'896E-5	0'7202	3'002E-3
70	1'028	1007	0'02881	2'780E-5	20'52	1'995E-5	0'7177	2'914E-3
80	0'9994	1008	0'02953	2'931E-5	20'96	2'097E-5	0'7154	2'832E-3
90	0'9718	1008	0'03024	3'086E-5	21'39	2'201E-5	0'7132	2'754E-3
100	0'9458	1009	0'03095	3'243E-5	21'81	2'306E-5	0'7111	2'680E-3

120	0'8977	1011	0'03235	3'565E-5	22'64	2'522E-5	0'7073	2'544E-3
140	0'8542	1013	0'03374	3'898E-5	23'45	2'745E-5	0'7041	2'420E-3
160	0'8148	1016	0'03511	4'241E-5	24'20	2'975E-5	0'7014	2'309E-3
180	0'7788	1019	0'03646	4'593E-5	25'04	3'212E-5	0'6992	2'207E-3
200	0'7459	1023	0'03779	4'954E-5	25'77	3'455E-5	0'6974	2'113E-3
250	0'6746	1033	0'04104	5'890E-5	27'60	4'091E-5	0'6946	1'911E-3
300	0'6158	1044	0'04418	6'871E-5	29'34	4'765E-5	0'6935	1'745E-3
350	0'5664	1056	0'04721	7'892E-5	31'01	5'475E-5	0'6937	1'605E-3
400	0'5243	1069	0'05015	8'951E-5	32'61	6'219E-5	0'6948	1'486E-3
450	0'4880	1081	0'05298	1'004E-4	34'15	6'997E-5	0'6965	1'383E-3
500	0'4565	1093	0'05572	1'117E-4	35'63	7'806E-5	0,6986	1'293E-3

Tabla A-9. Propiedades termodinámicas del aire a 75 kPa de presión

Temp., T [°C]	Densidad, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Calor específico, $C_p$ [J/kg·K]	Conductividad térmica, k [W/m·K]	Difusividad térmica, $\alpha$ [m <sup>2</sup> /s]	Viscosidad dinámica, $\mu$ [Pa·s]	Viscosidad cinemática, $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	Número de Prandtl, Pr	$\beta = 1/T$ [1/K]
-100	1'508	966	0'01582	1'086E-5	11'89	7'886E-6	0'7263	5'775E-3
-50	1'171	999	0'01979	1'692E-5	14'74	1'259E-5	0'7440	4'481E-3
-40	1'121	1002	0'02057	1'832E-5	15'27	1'362E-5	0'7436	4'289E-3
-30	1'074	1004	0'02134	1'979E-5	15'79	1'469E-5	0'7425	4'113E-3
-20	1'032	1005	0'02211	2'132E-5	16'30	1'579E-5	0'7408	3'950E-3
-10	0'993	1006	0'02288	2'291E-5	16'80	1'692E-5	0'7387	3'800E-3
-9	0'989	1006	0'02296	2'308E-5	16'85	1'703E-5	0'7385	3'787E-3
-8'75	0'988	1006	0'02298	2'312E-5	16'86	1'706E-5	0'7384	3'784E-3
-8	0'985	1006	0'02304	2'324E-5	16'90	1'715E-5	0'7382	3'773E-3
-7'3	0'983	1006	0'02309	2'336E-5	16'93	1'723E-5	0'7380	3'763E-3
0	0'956	1006	0'02364	2'456E-5	17'29	1'808E-5	0'7362	3'661E-3
4'5	0'941	1006	0'02397	2'531E-5	17'52	1'861E-5	0'7351	3'602E-3
5	0'939	1006	0'02401	2'540E-5	17'54	1'867E-5	0'7350	3'595E-3
5'25	0'938	1006	0'02403	2'544E-5	17'55	1'870E-5	0'7349	3'592E-3
5'5	0'938	1006	0'02405	2'549E-5	17'56	1'873E-5	0'7349	3'589E-3
5'75	0'937	1006	0'02407	2'553E-5	17'58	1'876E-5	0'7348	3'586E-3
10	0'922	1006	0'02439	2'626E-5	17'78	1'927E-5	0'7336	3'532E-3
15	0'907	1007	0'02476	2'714E-5	18'02	1'986E-5	0'7323	3'470E-3
16'75	0'901	1007	0'02489	2'745E-5	18'10	2'008E-5	0'7318	3'449E-3
17	0'901	1007	0'02491	2'750E-5	14'63	2'011E-5	0'7318	3'447E-3
17'25	0'900	1007	0'02493	2'754E-5	18'12	2'014E-5	0'7317	3'444E-3
17'75	0'898	1007	0'02497	2'763E-5	15'23	2'020E-5	0'7316	3'438E-3
18	0'897	1007	0'02499	2'767E-5	11'86	2'023E-5	0'7315	3'435E-3



19'5	0'893	1007	0'02510	2'794E-5	16'65	2'042E-5	0'7311	3'417E-3
19'75	0'892	1007	0'02512	2'798E-5	17'45	2'045E-5	0'7310	3'414E-3
20	0'891	1007	0'02514	2'802E-5	18'25	2'048E-5	0'7309	3'411E-3
25	0'876	1007	0'02551	2'893E-5	18'49	2'11E-5	0'7296	3'354E-3
30	0'862	1007	0'02588	2'983E-5	18'72	2'173E-5	0'7282	3'299E-3
35	0'847	1007	0'02625	3'076E-5	18'95	2'236E-5	0'7268	3'245E-3
40	0'834	1007	0'02662	3'170E-5	19'18	2'300E-5	0'7255	3'193E-3
45	0'821	1007	0'02699	3'264E-5	19'41	2'364E-5	0'7241	3'143E-3
50	0'808	1007	0'02735	3'360E-5	19'63	2'429E-5	0'7228	3'095E-3
60	0'784	1007	0'02808	3'556E-5	20'08	2'562E-5	0'7202	3'002E-3
70	0'761	1007	0'02881	3'756E-5	20'52	2'695E-5	0'7177	2'914E-3
80	0'7397	1008	0'02953	3'960E-5	20'96	2'833E-5	0'7154	2'832E-3
90	0'7193	1008	0'03024	4'169E-5	21'39	2'974E-5	0'7132	2'754E-3
100	0'7000	1009	0'03095	4'382E-5	21'81	3'116E-5	0'7111	2'680E-3
120	0'6644	1011	0'03235	4'817E-5	22'64	3'407E-5	0'7073	2'544E-3
140	0'6322	1013	0'03374	5'266E-5	23'45	3'709E-5	0'7041	2'420E-3
160	0'6031	1016	0'03511	5'730E-5	24'20	4'019E-5	0'7014	2'309E-3
180	0'5764	1019	0'03646	6'205E-5	25'04	4'340E-5	0'6992	2'207E-3
200	0'5521	1023	0'03779	6'693E-5	25'77	4'668E-5	0'6974	2'113E-3
250	0'4993	1033	0'04104	7'958E-5	27'60	5'527E-5	0'6946	1'911E-3
300	0'4558	1044	0'04418	9'283E-5	29'34	6'438E-5	0'6935	1'745E-3
350	0'4192	1056	0'04721	1'066E-4	31'01	7'397E-5	0'6937	1'605E-3
400	0'3881	1069	0'05015	1'209E-4	32'61	8'402E-5	0'6948	1'486E-3
450	0'3612	1081	0'05298	1'356E-4	34'15	9'453E-5	0'6965	1'383E-3
500	0'3379	1093	0'05572	1'509E-4	35'63	1'055E-4	0'6986	1'293E-3

## AMONÍACO

Tabla A-10. Propiedades termodinámicas de amoníaco saturado

Temp., T	Presión de saturación, P	Densidad, $\rho$		Entalpía			Calor específico, $C_p$		Conductividad térmica, k		Viscosidad dinámica, $\mu$		Número de Prandtl, Pr		Coefficiente de expansión volumétrica, $\beta$
[°C]	[kPa]	[kg/m <sup>3</sup> ]		[kJ/kg]			[kJ/kg·K]		[mW/m·K]		[Pa·s]				[1/K]
		Líquido	Vapor	$h_{fg}$	$h_l$	$h_g$	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido
-40	71'690	690'2	0'6438	1388'6	19'17	1408	4'41	2'24	688'1	20'64	281'2	7'86	-	0'9955	1'76E-03
-30	119'43	677'8	1'037	1359'7	63'60	1423	4'47	2'33	654'6	21'15	244'1	8'15	-	1'017	1'85E-03
-20	190'08	665'1	1'603	1329'1	108'6	1438	4'51	2'43	622'0	21'77	214'4	8'45	1'821	1'041	1'94E-03
-10	280'71	652'1	2'391	1296'7	154'0	1451	4'56	2'54	590'1	22'50	190'2	8'75	1'718	1'072	2'05E-03
0	429'38	638'6	3'457	1262'2	200'0	1462	4'62	2'68	559'2	23'37	170'1	9'06	1'624	1'107	2'16E-03
10	615'05	624'6	4'868	1225'5	246'6	1472	4'68	2'84	529'1	24'37	153'0	9'36	1'539	1'147	2'30E-03
20	857'48	610'2	6'702	1186'4	293'8	1480	4'75	3'03	499'9	25'52	138'3	9'68	1'463	1'193	2'45E-03
25	1003'6	602'8	7'803	1165'8	317'7	1483	4'79	3'14	485'6	26'16	131'7	9'84	1'430	1'218	2'54E-03
30	1167'2	595'2	9'053	1144'4	341'8	1486	4'83	3'25	471'4	26'85	125'5	10'00	1'399	1'244	2'64E-03
35	1351'2	587'4	10'45	1122'3	366'1	1488	4'88	3'38	457'4	27'59	119'6	10'16	1'372	1'272	2'75E-03
40	1555'4	579'4	12'03	1099'3	390'6	1490	4'93	3'51	443'5	28'38	114'0	10'33	1'347	1'303	2'87E-03
45	1783'2	571'3	13'80	1075'3	415'5	1491	4'99	3'66	429'7	29'24	108'8	10'50	1'327	1'335	3'01E-03
50	2034'0	562'9	15'79	1050'5	440'6	1491	5'06	3'82	416'3	30'16	103'8	10'67	1'310	1'371	3'16E-03
55	2311'1	554'2	18'01	1024'5	466'1	1491	5'14	4'01	402'9	31'16	99'0	10'86	1'297	1'409	3'34E-03
60	2615'6	545'2	20'49	997'3	492'0	1489	5'24	4'21	389'6	32'26	94'5	11'05	1'288	1'452	3'54E-03
70	3313'5	526'3	26'41	938'9	545'0	1484	5'47	4'70	363'2	34'80	85'9	11'47	1'287	1'551	4'04E-03
80	4142'0	505'7	33'89	874'0	600'3	1474	5'78	5'36	337'1	38'00	78'0	11'95	1'312	1'683	4'74E-03
90	5116'7	482'8	43'48	800'6	658'6	1459	6'25	6'29	311'0	42'24	70'5	12'55	1'375	1'871	5'79E-03
95	5664'3	470'2	49'33	759'8	689'2	1449	6'57	6'93	297'9	44'99	66'8	12'91	1'429	1'999	6'52E-03

100	6255'3	456'6	56'12	715'6	721'0	1437	6'99	7'76	284'8	48'36	63'2	13'32	1'503	2'163	7'49E-03
105	6892'3	441'9	64'06	667'2	754'4	1422	7'56	8'88	271'5	52'65	59'6	13'82	-	-	-
110	7578'3	425'6	73'53	613'4	789'7	1403	8'36	10'46	258'1	58'33	56'0	14'42	-	-	-
115	8317'0	407'2	85'18	552'3	827'7	1380	9'63	12'91	244'6	66'28	52'3	15'19	-	-	-
120	9112'5	385'5	100'1	480'3	869'9	1350	11'94	17'21	231'2	78'40	48'3	16'21	-	-	-
130	10898	312'3	156'7	247'3	992'0	1239	54'21	76'49	221'9	160'39	37'3	20'63	-	-	-
132'25	11333	225'0	225'2	0	1119	1119	∞	∞	∞	∞	-	-	-	-	-

Tabla A-11. Entalpía de amoníaco sobrecalentado

	t [°C]	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
t <sub>sat</sub>	P	h																	
[°C]	[kPa]	[kJ/kg]																	
-40	71'690	1430	1452	1473	1495	1516	1538	1559	1581	1602	1624	1646	1668	1690	1712	1734	1756	1778	
-35	93'100	1427	1449	1471	1493	1515	1536	1558	1580	1601	1623	1645	1667	1689	1711	1733	1755	1778	
-30	119'43		1446	1469	1491	1513	1535	1556	1578	1600	1622	1644	1666	1688	1711	1733	1755	1778	
-25	151'50		1442	1466	1488	1510	1533	1555	1577	1599	1621	1643	1665	1687	1710	1732	1754	1777	
-20	190'08			1462	1485	1508	1530	1552	1575	1597	1619	1641	1664	1686	1708	1731	1753	1775	
-18'9	200'00			1461	1484	1507	1529	1552	1574	1597	1619	1641	1664	1686	1707	1730	1752	1774	
-15	236'20			1457	1481	1504	1527	1550	1572	1595	1617	1639	1662	1684	1707	1730	1752	1774	
-10	280'71				1476	1500	1523	1546	1569	1592	1615	1637	1660	1683	1705	1728	1751	1773	
-5	354'90				1470	1495	1519	1542	1566	1589	1612	1635	1658	1681	1704	1727	1750	1773	
0	429'38					1488	1514	1538	1562	1585	1609	1632	1655	1678	1701	1724	1747	1770	
5	516'00					1481	1507	1532	1557	1581	1605	1628	1652	1675	1699	1723	1746	1770	
10	615'05						1500	1526	1551	1576	1600	1624	1648	1672	1696	1720	1744	1768	
15	728'80						1491	1518	1545	1570	1595	1620	1644	1668	1692	1716	1740	1764	
20	857'48							1509	1537	1564	1589	1614	1639	1664	1688	1713	1738	1762	
25	1003'6							1499	1528	1556	1582	1608	1634	1659	1683	1709	1734	1759	
30	1167'2								1517	1547	1574	1601	1627	1653	1678	1704	1730	1755	
35	1351'2								1505	1537	1565	1593	1620	1646	1672	1699	1725	1751	
40	1555'4									1523	1554	1584	1612	1639	1665	1693	1720	1747	
45	1783'2									1509	1542	1573	1602	1630	1658	1687	1715	1743	
49'3	2000'0									1496	1529	1562	1592	1622	1650	1680	1709	1739	
50	2034'0										1527	1560	1591	1621	1649	1680	1709	1739	
55	2311'1											1510	1546	1579	1610	1639	1671	1702	1733

60	2615'6	1529	1564	1597	1628	1662	1695	1728
65	2947'8	1509	1547	1582	1615	1652	1687	1722
70	3313'5		1527	1566	1601	1639	1676	1713

Tabla A-12. Entalpía de amoníaco subenfriado

	t [°C]	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
t <sub>sat</sub> [°C]	P [kPa]	h [kJ/kg]											
-40	71'690	-24'7											
-35	93'100	-24'7	19'2										
-30	119'43	-24'7	19'2										
-25	151'50	-24'6	19'2	63'6									
-20	190'08	-24'6	19'3	63'7									
-18'9	200'00	-24'6	19'3	63'7	108'6								
-15	236'20	-24'6	19'3	63'7	108'6								
-10	280'71	-24'5	19'4	63'7	108'6								
-5	354'90	-24'4	19'4	63'8	108'7	154'1							
0	429'38	-24'4	19'5	63'9	108'7	154'1							
5	516'00	-24'3	19'5	63'9	108'8	154'2	200'1						
10	615'05	-24'2	19'6	64'0	108'9	154'2	200'1						
15	728'80	-24'1	19'7	64'1	109'0	154'3	200'2	246'6					
20	857'48	-24'0	19'8	64'2	109'1	154'4	200'3	246'7					
25	1003'6	-23'9	20'0	64'3	109'2	154'5	200'4	246'8	293'9				
30	1167'2	-23'7	20'1	64'5	109'3	154'6	200'5	246'9	293'9				
35	1351'2	-23'6	20'3	64'6	109'4	154'8	200'6	247'0	294'0	341'8			
40	1555'4	-23'4	20'4	64'8	109'6	154'9	200'7	247'1	294'1	341'9			
45	1783'2	-23'2	20'6	65'0	109'8	155'1	200'9	247'2	294'2	342'0	390'7		
49'3	2000'0	-22'9	20'8	65'2	110'0	155'2	201'0	247'4	294'3	342'1	390'7		
50	2034'0	-22'9	20'8	65'2	110'0	155'2	201'0	247'4	294'3	342'1	390'7		
55	2311'1	-22'7	21'1	65'4	110'2	155'4	201'2	247'5	294'5	342'2	390'8	440'6	

60	2615'6	-22'4	21'3	65'6	110'4	155'7	201'4	247'7	294'6	342'3	390'8	440'6	
65	2947'8	-22'1	21'6	65'9	110'7	155'9	201'6	247'9	294'8	342'4	390'9	440'6	491'9
70	3313'5	-21'8	21'9	66'2	110'9	156'2	201'9	248'1	294'9	342'5	391'0	440'6	491'8

## METANO

Tabla A-13. Propiedades termodinámicas de metano líquido

Temp., T	Densidad, $\rho$	Calor específico, $C_p$	Conductividad térmica, k	Difusividad térmica, $\alpha$	Viscosidad dinámica, $\mu$	Viscosidad cinemática, $\nu$	Número de Prandtl, Pr	Coefficiente de expansión volumétrica, $\beta$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg·K]	[W/m·K]	[m <sup>2</sup> /s]	[Pa·s]	[m <sup>2</sup> /s]		[1/K]
-160	420'2	3492	0'1863	1'270E-7	113'3	2'699E-7	2'126	3'52E-3
-150	405'0	3580	0'1703	1'174E-7	91'69	2'264E-7	1'927	3'91E-3
-140	388'8	3700	0'1550	1'077E-7	75'51	1'942E-7	1'803	4'44E-3
-130	371'1	3875	0'1402	9'749E-8	62'88	1'694E-7	1'738	5'20E-3
-120	351'4	4146	0'1258	8'634E-8	52'57	1'496E-7	1'732	6'37E-3
-110	328'8	4611	0'1115	7'356E-8	43'77	1'331E-7	1'810	8'41E-3
-100	301'0	5578	0'0967	5'761E-8	35'77	1'188E-7	2'063	1'282E-2
-90	261'7	8902	0'0797	3'423E-8	27'61	1'055E-7	3'082	2'922E-2



Tabla A-14. Propiedades termodinámicas de metano gas a 1 atm de presión

Temp., T	Densidad, $\rho$	Calor específico, $C_p$	Conductividad térmica, $k$	Difusividad térmica, $\alpha$	Viscosidad dinámica, $\mu$	Viscosidad cinemática, $\nu$	Número de Prandtl, Pr	Coefficiente de expansión volumétrica, $\beta$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg·°C]	[W/m·°C]	[m <sup>2</sup> /s]	[Pa·s]	[m <sup>2</sup> /s]		[1/K]
-50	0'8761	2243	0'02367	1'204E-5	8'564	9'774E-6	0'8116	4'481E-3
0	0'7158	2217	0'03042	1'972E-5	10'28	1'436E-5	0'7494	3'661E-3
50	0'6050	2302	0'03766	2'704E-5	11'91	1'969E-5	0'7282	3'095E-3
100	0'5240	2443	0'04534	3'543E-5	13'45	2'567E-5	0'7247	2'680E-3
150	0'4620	2611	0'05344	4'431E-5	14'91	3'227E-5	0'7284	2'363E-3
200	0'4132	2791	0'06194	5'370E-5	16'30	3'944E-5	0'7344	2'113E-3
300	0'3411	3158	0'07996	7'422E-5	18'86	5'529E-5	0'7450	1'745E-3
400	0'2904	3510	0'09918	9'727E-5	21'19	7'297E-5	0'7501	1'486E-3
500	0'2529	3836	0'11933	1'230E-4	23'34	9'228E-5	0'7502	1'293E-3
1000	0'1536	5042	0'22562	2'914E-4	32'81	2'136E-4	0'7831	7'855E-4
1500	0'1103	5701	0'31857	5'068E-4	44'34	4'022E-4	0'7936	5'640E-4
2000	0'0860	6001	0'36750	7'120E-4	63'60	7'395E-4	1'0386	4'399E-4

Tabla A-15. Propiedades termodinámicas de metano gas a 75 kPa de presión

Temp., T	Densidad, $\rho$	Calor específico, $C_p$	Conductividad térmica, $k$	Difusividad térmica, $\alpha$	Viscosidad dinámica, $\mu$	Viscosidad cinemática, $\nu$	Número de Prandtl, Pr	Coefficiente de expansión volumétrica, $\beta$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[J/kg·°C]	[W/m·°C]	[m <sup>2</sup> /s]	[Pa·s]	[m <sup>2</sup> /s]		[1/K]
-50	0'6485	2243	0'02367	1'617E-5	8'564	1'320E-5	0'8116	4'481E-3
0	0'5298	2217	0'03042	2'590E-5	10'28	1'970E-5	0'7494	3'661E-3
50	0'4478	2302	0'03766	3'653E-5	11'91	2'660E-5	0'7282	3'095E-3
100	0'3879	2443	0'04534	4'787E-5	13'45	3'468E-5	0'7247	2'680E-3
150	0'3420	2611	0'05344	5'986E-5	14'91	4'360E-5	0'7284	2'363E-3
200	0'3058	2791	0'06194	7'255E-5	16'30	5'328E-5	0'7344	2'113E-3
300	0'2525	3158	0'07996	1'003E-4	18'86	7'470E-5	0'7450	1'745E-3
400	0'2150	3510	0'09918	1'314E-4	21'19	9'858E-5	0'7501	1'486E-3
500	0'1872	3836	0'11933	1'662E-4	23'34	1'247E-4	0'7502	1'293E-3
1000	0'1137	5042	0'22562	3'937E-4	32'81	2'886E-4	0'7831	7'855E-4
1500	0'0816	5701	0'31857	6'847E-4	44'34	5'434E-4	0'7936	5'640E-4
2000	0'0637	6001	0'36750	9'619E-4	63'60	9'991E-4	1'0386	4'399E-4